

論文目録

報告番号	甲 工 乙 工 第 49 号 工 修	氏 名 前 田 龍 己
学 位 論 文 題 目	電力系統の電圧安定化制御方式と安定性評価法に関する研究	
論文の目次		
第1章 緒 言		
第2章 電圧安定性問題		
第3章 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察		
第4章 過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討		
第5章 ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法		
第6章 結 言		
(添付資料)		
(参考文献)		
参考論文		
主論文		
1. 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察 (電気学会論文誌B、前田龍己、大西徳生、鈴木茂行、114巻2号、平成6年2月)		
2. ニューラルネットによる緊急制御の臨界余裕時間を指標とした過渡電圧安定性の評価 (電気学会論文誌B、前田龍己、瀧川喜義、湊嘉徳、横山明彦、平成7年3月号掲載予定)		
3. Assessment of Transient Voltage Stability Based on Critical Operating Time of Emergency Control Using Neural Networks (International Seminar on Bulk Power System Voltage Phenomena-III Davos, Switzerland, Tatsumi Maeda, Kiyoshi Takigawa, Yoshinori Minato, Akihiko Yokoyama, 22~26 August 1994)		

副論文

1. Coordinated Stabilizing Control of Exciter, Turbine and Breaking Resister  
(IEEE Trans. Power Systems, Fujio Ishiguro, Masaru Shimomura,  
Seiichi Tanaka, Tatsumi Maeda, Kunio Matsushita, Hiroshi Sugimoto,  
August 1986)
2. Integrated Control of Generator Stability by Microcomputer  
(IFAC Symposium, Tatsumi Maeda, Kunio Matsushita, Hiroshi Sugimoto,  
Fujio Ishiguro, Masaru Shimomura, Seiichi Tanaka, August 1986)
3. 励磁系、タービン、制動抵抗器を統合した適応形制御方式による安定度の向上  
(電気学会論文誌B、106巻11号、杉本宏、松下邦雄、前田龍己、  
石黒富士男、下村勝、田中誠一、昭和61年11月)
4. 励磁系、タービン、制動抵抗器を統合した適応形制御装置の試作と試験  
(電気学会論文誌B、106巻11号、杉本宏、松下邦雄、前田龍己、  
石黒富士男、下村勝、田中誠一、昭和61年11月)



論文内容要旨

報告番号	甲 工	49	号	氏 名	前 田 龍 己
	工 修				
学 位 論 文 題 目		電力系統の電圧安定化制御方式と安定性評価法に関する研究			
内容要旨					
<p>電力系統に発生する不安定現象は、電力の安定輸送を妨げ最悪の場合には大規模な停電や設備の損壊を引き起こす。このため、系統の安定性に関する技術開発や研究課題は、大規模停電を防止し電力の供給信頼度を確保すること、さらに需要の増加に対応して経済的な設備形成をはかり低廉で安定な電力を供給すること等を目的に系統計画・運用上の中心的課題として位置づけされている。</p> <p>系統の安定性問題は、2種類に大別される。1つは発電機間の同期運転の安定性に関するもので、従来より安定度と言え、この安定性を指していた。</p> <p>もう1つは、最近、特に注目を集めている電圧安定性問題である。近年の電力系統は、電源の大容量化と偏在化が進み長距離大容量の基幹送電線が慢性的に重潮流化する傾向にある。これに負荷側の要因等が加わり世界各国の電力系統で電圧不安定現象を1原因とする大規模停電が発生した。我が国では、1987年夏、基幹系統の母線電圧がゆっくりと低下し電圧が崩壊した。これを契機に電圧安定性問題に関し進行速度の遅い現象を主対象に研究開発が活発に行われてきている。</p> <p>一方、最近、系統の大外乱後に秒オーダーで急速に電圧崩壊していく現象が観測され、過渡的な電圧安定性が注目されている。この問題についても、貴重な基礎研究が行われているが、現象の発見が比較的新しいことから電圧の安定化制御方式や系統の安定性監視方法などにつき精力的な研究開発が要望されている。また、今後も電気エネルギーの需要増加が予想されており、新技術の導入等により、既設電力設備を有効活用し複雑化していく電力系統を安定に運用するための技術開発の重要性が一段と高まっていくと考えられる。</p> <p>そこで、本研究では過渡電圧安定性問題をメインテーマに、系統の安定運用と電圧安定性向上の観点から基礎的な研究を行い論文にまとめた。</p> <p>・電圧安定性問題</p> <p>系統の安定性問題について概説し電圧安定性問題の特徴を明らかにすると</p>					



ともに電圧安定性問題を分類し、過渡電圧安定性問題の位置づけと後述の研究課題を明確にし、第2章「電圧安定性問題」にまとめた。

・電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察

電圧安定性を動的な観点からとらえた基礎実験を行い、系統の不平衡状態や送電線の再閉路等、種々の系統条件と負荷特性が電圧安定性に与える影響を明らかにし、また、系統状態と安定送電限界の検討や負荷特性と電圧不安定現象の進行速度との関係ならびに故障送電線再閉路時の現象の考察から、今後の研究に有用な新しい知見を得、第3章「電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察」に研究結果をまとめた。

・過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討

系統の電圧安定性向上の観点から、系統の受電端における過渡電圧安定限界の解析を行い、系統計画・運用に有用な電源電圧と受電端設備の制御方法を明らかにし、さらに、パワーエレクトロニクス技術の応用により過渡領域における電圧安定化能力を向上させる電圧安定化制御方式の提案とその有効性の検討を行い、第4章「過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討」に研究結果をまとめた。

・ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法

系統運用計画の効率化や系統のオンライン監視への応用の観点から、高速な過渡電圧安定性評価法の開発として、緊急制御の臨界余裕時間を評価指標とし、2つの多層形ニューラルネットワークを適用した過渡電圧安定性評価法を提案し、モデル系統における検討から有効性を明らかにし、その研究結果を第5章「ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法」にまとめた。



様式9

論文審査の結果の要旨

報告番号	(甲 工) 乙 工 第 49 号 工 修	氏 名	前 田 龍 己
審査委員	主 査 鈴 木 茂 行 副 査 牛 田 明 夫 副 査 伊 坂 勝 生		
学位論文題目 電力系統の電圧安定化制御方式と安定性評価法に関する研究			
審査結果の要旨 <p>電力系統が大規模になるにともない、電力の安定輸送は重要な課題である。このため、電力系統の安定性に関する技術開発、電力需要の増加に対応しての経済的な設備形成等が中心的課題として位置づけられている。特に、最近注目されているのは電圧安定性問題である。近年の電力系統は電源の大容量化と偏在地が進み、基幹送電線が慢性的に重潮流化する傾向にある。これに負荷側の要因等が加わり、世界各国の電力系統で大規模停電が発生する等の進行速度の遅い現象の研究は活発に行われている。一方、電力系統の大外乱後に秒オーダーで急速に電圧崩壊が生じる現象も観測され、過渡的な電圧安定性も注目されている。しかし、この現象は比較的新しく、電圧の安定化制御方式や系統の安定性監視方法が十分確立されていない。</p> <p>そこで、本研究は過渡電圧安定性問題について、系統の安定運用と電圧安定性向上の観点から研究・検討を行っている。</p>			

その結果、次のような知見が得られた。

- 1) 電圧安定性問題を分類し、その特徴を明らかにしている。
- 2) 電力系統の種々の動作条件と負荷特性が電圧安定性に与える影響を明確にしている
- 3) 電力系統の電圧安定性向上のため、受電端における過渡電圧安定限界の解析を行い、系統計画・運用に有用な電源電圧と受電端設備の制御方法を明らかにしている。
- 4) 新しい電圧安定化制御方式を提案し、その有効性を立証している。
- 5) 多層形ニューラルネットワークを適用した過渡電圧安定性評価法を提案し、その有用性を明らかにしている。

以上の結果から電力系統の電圧を安定化させるための制御方式と評価法を提案し、その有効性を明確にしている。

したがって、本研究は新規性に富み、学術的な価値が高いものであり、本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと判定する。

なお、論文の審査には、大西徳生 助教授の協力を得た。







電力系統の電圧安定化制御方式と  
安定性評価法に関する研究

1995年8月

前田 龍巳



②

電力系統の電圧安定化制御方式と  
安定性評価法に関する研究

1995年3月

前 田 龍 己

## 目 次

第1章 緒 言	1
第2章 電圧安定性問題	3
1. まえがき	3
2. 電力系統の安定性問題	3
3. 電圧安定性問題の分類	5
4. 過渡電圧安定性問題の研究課題	5
5. まとめ	7
第3章 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察	8
1. まえがき	8
2. 系統不平衡状態が静的電圧安定性に与える影響	8
2.1 系統不平衡状態の送電限界電力	8
2.2 計算例と考察	12
3. 動的電圧安定性に関する基礎実験	14
3.1 実験回路の構成	14
3.2 実験方法	15
4. 実験結果	17
4.1 動的電圧安定度	17
4.2 送電線再閉路の効果	19
5. 考察	20
5.1 負荷の電圧特性が電圧安定性に与える影響	20
5.2 再閉路実施ケースの現象	22
6. まとめ	26
第4章 過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討	27
1. まえがき	27
2. 過渡電圧安定限界	27
2.1 過渡電圧安定性の基礎的解析方法	29
2.2 過渡電圧安定限界の解析	30
3. 電圧安定化の基礎的検討	34



3.1 電源と受電端設備による電圧安定化	34
3.2 系統内発電機の電圧安定化効果	37
4. 新しい過渡電圧安定化制御方式	39
4.1 基本的な考え方	39
4.2 本制御方式による過渡電圧安定化の原理	40
5. 動的シミュレーション検討	44
5.1 動的シミュレーション検討方法	44
5.2 電圧安定化方法のシミュレーション検討	47
5.3 ATSCによる過渡電圧安定性の向上効果	52
5.4 系統内発電機の電圧安定化効果	58
6. まとめ	68
第5章 ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法	69
1. まえがき	69
2. 電圧崩壊緊急制御	70
2.1 モデル系統の基本特性	70
2.2 電圧崩壊の緊急制御	72
3. ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法	74
3.1 多層形ネットワークと学習アルゴリズム	74
3.2 多層形ネットワークによる過渡電圧安定性評価手法	76
4. モデル系統への適用	78
4.1 NNの構成と学習パターン	78
4.2 動的シミュレーション解析	81
4.3 提案システムの評価	82
5. まとめ	89
第6章 結 言	90

(添付資料)  
(参考文献)

## 第1章 緒 言

自然界に存在するエネルギーを電気エネルギーに変換し、人類が最終的に利用する需要地点まで、これを輸送する画期的なシステムが19世紀末に開発された。電力系統の誕生である。以来、人類は、社会、経済、文化の発展に、この便利な電気エネルギーをフルに活用し、この需要を供給するシステムとして電力系統も設備の新增設と系統連系を繰り返し成長してきた。日本を例にして見ると、地域の電灯負荷への電力供給からスタートした電力系統も、1991年現在で、およそ発電所数1,300カ所、送電線こう長16,500km、変電所数5,300カ所で、北は北海道から南は九州まで系統連系され、最高電圧500kVで最大電力150GWを生産・輸送するという規模に至っており、電力系統は、地球上に存在する最も巨大なシステムに発展している。

今後も、人類が消費する電気エネルギーは増加していくと予想されており、規模の拡大とともに複雑化していく電力系統をコントロールして、安定に運用していくための技術開発の重要性が一段と高まっていくと考えられる。

特に、電力系統の計画・運用において、系統の安定性に関する技術開発や研究課題は、系統の大規模停電を防止し電力の安定供給とその供給信頼度を確保すること。また、巨大システムを構成する既設設備の有効活用や新技術の導入により需要の増加に対応し経済的な電力系統の拡大をはかり低廉な電力を供給することなどを目的として、電力系統の誕生から今日に至るまで、一貫して中心的課題として位置づけられ精力的な研究開発が実施されてきている。

系統の安定性問題は、2種類に大別される。1つは発電機間の同期運転の安定性に関するものである。従来より、安定度と言えば、この安定性を指していた。

もう1つは、最近、特に注目を集めている電圧安定性問題である。近年の電力系統は、電源の大容量化と偏在化が進み長距離大容量の輸送形態となっているが、その基幹送電線が慢性的に重潮流化する傾向にあり電圧安定性の面で厳しい状況下におかれている。これに負荷側の要因等が加わり、世界各国の電力系統で電圧不安定



現象を原因の1つとする大規模停電が発生していることは周知の事実である。我が国では、1987年夏、基幹系統の母線電圧がゆっくりと低下し電圧が崩壊した。これを契機に、電圧安定性問題に関する研究開発が従来以上に活発に行われている。

一方、最近、系統の大外乱後に秒オーダーで電圧崩壊していく現象が観測され、過渡的な電圧安定性問題が注目を集めている。この過渡的な電圧崩壊現象についても、先駆的な研究報告がなされている。しかし、現象の発見が比較的新しいこともあり、過渡的な電圧安定性問題に関する研究開発はスタートしたところというのが現状である。

そこで、本研究では系統安定性の向上と系統の安定運用の観点から重要な課題となってきた過渡電圧安定性問題をメインテーマに基礎的な研究を実施した。

本論文は、四国電力(株)での研究および同社からの受託研究の成果も活用し、徳島大学鈴木教授および大西助教授の御指導のもとに行った研究をまとめたものである。本研究が電力系統の安定性の向上に少しでも役立てば幸いである。

## 第2章 電圧安定性問題

### 1. まえがき

電力系統は、発電所、送変電設備および負荷などにより構成されるシステムである。電力系統に発生する不安定現象は、電力の安定輸送を妨げ最悪の場合には大規模な停電や設備の損壊を引き起こすことがある。このため、電力系統の送電可能な電力が系統の安定性により制約をうけることになり、低廉で安定な電力供給を阻む要因となっている。従って、電力系統の安定性問題は、電力系統分野の重要課題として位置づけられている。

ところで、最近の電力系統の安定性問題として、急速に母線電圧が崩壊していく電圧不安定現象が注目を集めている。

そこで、本章では、電力系統における安定度と電圧安定性について定性的に概説し電圧安定性問題の特徴を述べる。そのうえで、電圧安定性問題を分類し、本研究の位置づけを明らかにするとともに本論文の後述の研究課題を示すこととする。

### 2. 電力系統の安定性問題

電力系統の安定性問題は2種類に大別される。

1つは、電力系統内に存在する発電機間の同期運転の安定性に関するものである。従来より、安定度と言え、この安定性を指しており狭義の意味での安定性問題とすることができる。安定性とは、平衡した状態にある電力系統において状態変化が発生した場合に、変化後の系統状態において発電機が同期運転を継続できるか、否かに関する系統の特性をいい、安定度はその度合いをいう。安定度は、その対象とする時間領域により、過渡、中間、定態に分類されている。[1]

一般に、系統の構成要素である送電線が長距離になっていけば、発電機間の電氣的距離が離れるため同期運転が難しくなり、安定に送電できる電力が低下していく。

特に、雷などによる過酷な系統事故に対しては、過渡領域での発電機の入出力の不平衡による加減速が大きく発電機の同期運転の維持が困難となるため、安定送電



限界電力が制約され、通常、送電線の熱容量限度を大きく下回っている。

そこで、筆者は共同研究者らと、系統の安定度を飛躍的に向上させて送電容量の増大をはかるとともに、大規模停電を防止するための適応的な安定化制御方式を提案した。この制御方式に基づくデジタル型の発電機安定化装置を試作し、模擬送電設備による試験およびフィールド試験によりその有効性を明らかにしている。[2]～[9]

もう1つの安定性問題は、最近、特に注目を集めている電圧安定性の問題である。

近年の電力系統では、電力設備用地の取得難や地球環境問題から電源の大容量化と偏在化が進み、都市部など需要の中心地帯に遠隔な発電所の発電電力を長距離大容量の送電線により輸送する形態となっている。最近、こうした基幹送電線が慢性的に重潮流化する傾向になってきており電圧安定性の面で厳しい状況下におかれている。また、一方では、インバータエアコン等の冷房負荷の急増など系統負荷の様相が変化してきており、負荷の電圧特性の定電力特性化や低力率化の傾向が強まっている。[10][24]

こうした系統側、負荷側の様々な要因が輻輳し、1978年フランス、1982年にベルギー、翌1983年にスウェーデンと世界各国の電力系統で電圧不安定現象が発生しており、これを一原因として大規模な停電が発生していることは周知の事実である。[11]

我が国では1987年夏の猛暑、昼休み後の需要の立ち上がり時に基幹系統において電圧不安定現象が進展し、関東地方で大規模停電が発生している。

電力系統では、負荷が有効電力を消費すると同時に消費している無効電力や電力輸送時の無効電力損失に対し、能動的な無効電力の発生源である発電機と調相設備等により無効電力を供給し、これらとともに変圧器のタップを制御することにより系統電圧が一定範囲内に維持されている。従って、負荷が要求する有効電力を供給するためには無効電力供給が必要であり、一方で、その供給設備が有限であることから、電力系統が送電可能な電力には必ず限界が存在するということである。需要の増加や系統故障などにより、この限界を超える条件が生じたとき、不安定現象が発生し系統の母線電圧が崩壊していくのである。

このように、安定度では発電機間の同期運転に関する安定性が問題となったのに

対し、この電圧安定性問題では、系統の母線電圧の安定性が問われる。すなわち、系統や負荷状態の変化に対して母線電圧が安定に維持できるのか、それとも、電圧不安定現象が発生して、母線電圧が大幅に低下していき電圧が崩壊するのかが問題であり、系統安定性から見た特徴となっている。

### 3. 電圧安定性問題の分類

我が国の基幹系統で経験された電圧不安定現象は、負荷の増加に伴い基幹系統の母線電圧がゆっくりと低下していき、20分程度で進展して母線電圧が崩壊している。これを契機に電圧安定性問題に関して、ゆっくりと進展する電圧不安定現象を対象に、電圧崩壊メカニズムの解明、安定性の評価と監視手法、電圧安定化制御方法の開発など精力的な研究が行われてきている。

一方、最近の我が国の電力系統において、系統の大外乱発生後、1秒間に負荷母線電圧が定格の60%まで急速に低下し秒オーダーで電圧崩壊していく現象が、世界で初めて観測され、過渡的な電圧安定性問題が注目を集めている。[12]

電圧安定性問題は、一般に、前者のように母線電圧が分～10分のオーダーでゆっくり低下していくような進行速度の遅い現象を対象としたものと、後者のように大外乱発生後に母線電圧が秒オーダーで急速に電圧崩壊するような進行速度の速い現象を対象とした、いわゆる過渡的な電圧安定性問題の2つに分類されている。[12][13]

### 4. 過渡電圧安定性問題の研究課題

過渡電圧安定性問題は系統安定性の一重要問題と位置づけされる。この問題については、先駆的な研究がなされているが現象の発見が比較的新しいことから研究開発がスタートしたところというのが現状であり、不安定現象の安定化方法や系統電圧の安定性監視方法の研究などについて精力的な研究が期待されている。

本研究では、今後も大規模化、複雑化の一途をたどる電力系統の安定運用や経済的な設備形成に役立てていくことを念頭に、過渡電圧安定性問題を対象として基礎的な研究を行うことにした。



まず、過渡的な電圧安定性の基本的な特性の把握が研究の基礎となる。

電力系統における電圧不安定現象は、本来、動的な現象である。しかし、従来の研究では、需要の急増やこれに伴う変圧器のタップ、調相設備の制御動作などにより、ゆっくり進展する不安定現象を対象とするものが多く、現象の物理的意味の解明や電圧安定性の基本特性の把握については、静的、あるいは、準静的立場からの検討がほとんどであった。[14]

一方、急速な電圧崩壊現象を対象として、その基本特性の把握や不安定現象の進展メカニズムの解明等に関する貴重な研究例があるものの、系統の不平衡状態を考慮した研究は見あたらない。[12][15]～[17]

従って、実系統では、種々の系統事故や運用操作による系統変化が発生するという観点から見ると、電圧安定性の基本特性の把握が従来の研究だけで十分であったとはいえず、電圧安定性に関する新しい知見を得る意味からも実験なども含め、さらに、研究が必要であると考えられる。

次に、系統の安定性の向上という観点から、系統電圧の安定化制御が重要な課題である。長距離送電線で電力供給される負荷系統の母線では、過渡的な電圧崩壊現象が発生する恐れがあり、系統の送電限界電力が制約されることが考えられる。このため、過渡的な電圧不安定現象を防止し、母線電圧の安定化をはかる制御方式の開発が強く要請されている。

従来から電圧の安定化に適用されている電力用コンデンサ (SC) の高速投入では、制御動作に時間を要することから、制御応答がきわめて速い静止型無効電力補償装置 (SVC) など、パワーエレクトロニクス応用機器の適用が有効であると考えられる。[18]

しかし、電圧が大幅に低下している領域では、SVCでは無効電力の供給能力が減少するという問題点があり、過渡電圧の安定化に有効な制御方式の開発が要望されている。

さらに、系統の安定運用をはかるうえで系統運用計画の効率化や系統電圧のオンライン監視等が重要な課題である。このためには、高速な電圧安定性の評価方法の開発が不可欠である。

従来より、進行速度の遅い現象に関する電圧安定性の評価については、潮流多根

解析や各種の電圧制御システムの動作を考慮した連続静的解析などの解析手法に基づいた電圧安定性指標によって電圧安定性を評価する手法が開発されてきており、系統運用計画における調相設備計画や系統のオンライン監視などに役立てられている。[14][19][20][32]

しかしながら、これらの電圧安定性評価手法は、過渡的な領域における発電機や励磁制御系さらに負荷の動特性が考慮されていないため、過渡電圧安定性に対して評価をすることが困難であり、高速な、過渡電圧の安定性評価法の開発が強く求められている。

そこで本研究では、電圧安定性の基本特性の把握として、系統の不平衡状態や送電線の再閉路等、種々の系統条件と負荷特性が電圧安定性に与える影響に着目した基礎実験と考察を行い、その研究結果を「第3章 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察」にまとめた。

また、系統電圧の安定化については、過渡電圧安定限界の解析と過渡領域における電圧安定化能力を向上させる新しい過渡電圧の安定化制御方式等について検討し、「第4章 過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討」に研究結果をまとめた。

過渡電圧安定性評価法については、系統の電圧安定性監視への適用などを想定し、ニューラルネットワークを適用した過渡電圧安定性評価システムの提案と有効性の検証についての研究を行い、「第5章 ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法」に結果をまとめた。

なお、繁雑化を避けるため本文で割愛した式の導出や詳細な図を添付資料に示した。

## 5. まとめ

本章では、電力系統における安定度問題と電圧安定性問題について概説し、電圧安定性問題の特徴を示した。そのうえで、電圧安定性問題を分類し、本研究のメインテーマである過渡電圧安定性問題の位置づけを明らかにし、後述の研究課題と内容について述べた。



### 第3章 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察

#### 1. まえがき

最近の電力系統において、系統の大外乱後に負荷母線の電圧が急速に崩壊する不安定現象が観測され、過渡的な電圧安定性問題が重要課題になってきている。[12]

電圧安定性に関する研究を進める上で、その基本的な特性の把握が研究の基礎となる。前章で述べたように、従来は電圧安定性に関して静的、準静的観点からの研究が多く、また、実系統で発生する様々な系統変化や負荷特性などを考慮すると、必ずしも従来の研究だけで十分であったとはいえない。

そこで本章では、動的な観点から電圧安定性をとらえ、系統負荷の動特性と動的電圧安定性についての基礎実験と考察から過渡的な電圧安定性の基本特性の把握を行う。実系統を想定した系統変化として、系統の平衡故障だけでなく、基幹系統で多相再閉路方式を適用した送電線の系統不平衡故障や故障送電線の再閉路等、種々の系統状態を考慮することとする。[21][22]

以下では、実験結果を中心に、系統不平衡状態も含めて、負荷特性が動的電圧安定度や電圧不安定現象の進行速度に与える影響について明らかにする。さらに多相再閉路方式を適用している送電線における故障送電線の高速度再閉路による電圧安定性維持の効果、ならびに再閉路時の現象について考察する。[23]

#### 2. 系統不平衡状態が静的電圧安定性に与える影響

電圧安定性についての系統特性を系統側から観る場合、対象系統の送電限界電力を知ることは有効な手段と考えられる。[24] 以下では、系統不平衡状態を中心に系統状態が電圧安定性に与える影響について、送電限界電力により基本的な検討を行う。

##### 2.1 系統不平衡状態の送電限界電力

基幹系統の構成は、放射状とループ状に大別されるが、ここでは後者を対象とし、

系統不平衡状態と電圧不安定現象との関連において、その基本的特性が把握しやすいよう図3-1のモデル系統で考える。

図に示したように送電線路は、送電線Ⅰおよび送電線Ⅱの2ルートとし、各々の送電線は系統不平衡状態を考慮するために、多相再閉路方式を適用した平行2回線の送電線とする。

以下では、多相再閉路方式の系統における不平衡状態として、故障確率が高く、不平衡の度合いが大きいと想定される2回線同相1相しゃ断を選び、1回線3相しゃ断の平衡故障状態と送電限界電力を比較することにより、系統不平衡状態が電圧安定性に与える影響についての基本的な検討を行う。

負荷モデルとしては、後述の動的電圧安定度との対応から図3-1に示した誘導電動機（以下、IMと略記する。）の簡易モデルを用いる。

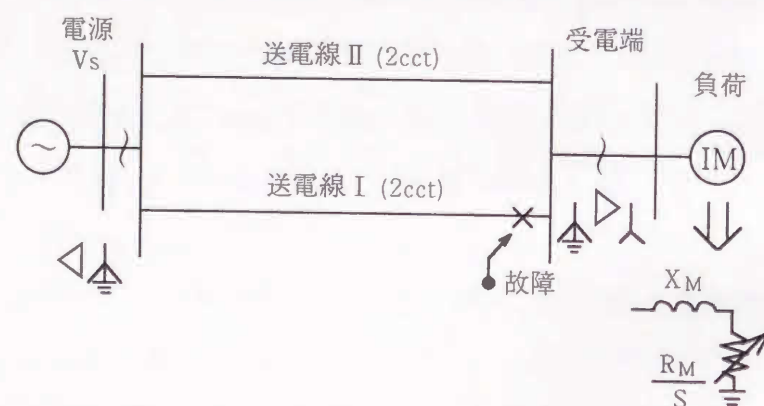


図3-1 モデル系統

さて、不平衡状態において負荷側の回路は、対称座標法により、次の方程式で示す正相回路と逆相回路で表現することができる。[25]

$$\dot{V}_{1M} = (R_M / S + j X_M) \cdot \dot{I}_{1M} \quad (3-1)$$

$$\dot{V}_{2M} = (R_M / (2 - S) + j X_M) \cdot \dot{I}_{2M} \quad (3-2)$$

ここで、 $V_M, I_M$ ：負荷端子電圧、電流

（添字1，2は、正相逆相を表わす）

$R_M$ ：IMの抵抗、 $X_M$ ：リアクタンス、 $S$ ：すべり

一方、平行2回線送電線の同相1相しゃ断では、各回線の電圧、電流が等しくなることから、2回線送電線をインピーダンスが1/2の1回線送電線に置換すると、対称座標法における1線断線故障時の等価回路を適用することができる。[26]

すなわち、図3-1の受電端における送電線Ⅰの2回線同相1相しゃ断時の不平衡状態の等価回路として図3-2を得る。なお、記号の意味は表3-1を参照されたい。



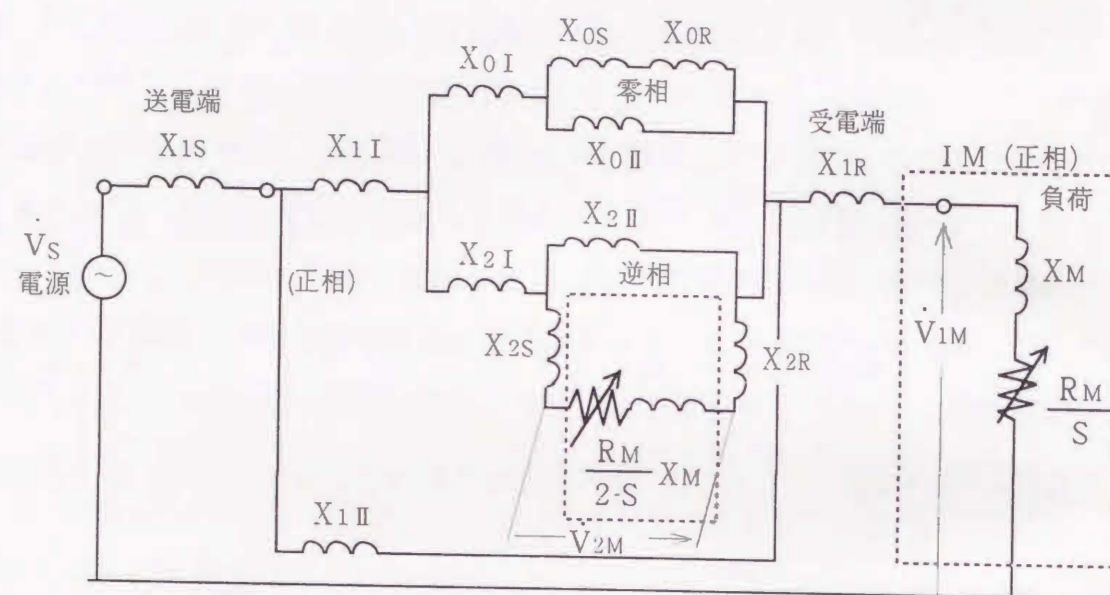


図3-2 不平衡状態の等価回路

表3-1 モデル系統の諸定数

送電線Ⅰ		送電線Ⅱ	
正相リアクタンス $X_{1I}$	0.30	正相リアクタンス $X_{1II}$	0.30 K
逆相リアクタンス $X_{2I}$	0.30	逆相リアクタンス $X_{2II}$	0.30 K
零相リアクタンス $X_{0I}$	1.35	零相リアクタンス $X_{0II}$	1.35 K
電源端変圧器		受電端変圧器	
正相リアクタンス $X_{1S}$	0.0005	正相リアクタンス $X_{1R}$	0.20
逆相リアクタンス $X_{2S}$	0.0005	逆相リアクタンス $X_{2R}$	0.20
零相リアクタンス $X_{0S}$	0.0005	零相リアクタンス $X_{0R}$	0.43
誘導機 $R_M$	0.0005	$X_M$	0.20

## 2.2 計算例と考察

図3-2の等価回路において、次の条件の基に、送電線Ⅰと送電線Ⅱのインピーダンスの比率  $K (=X_{1II}/X_{1I})$  をパラメータとし、電源電圧  $V_s$  を一定として表3-1により計算した結果を図3-3に示す。

(1) 送電限界付近では、 $I_M$ の逆相電力は正相電力に比べ無視できる程度に小さいため、逆相回路の  $I_M$ の抵抗を零とする。

(2) 逆相回路の  $I_M$ のリアクタンスを含めて、正相回路の負荷端子から電源側を見たリアクタンスを等価正相リアクタンス  $X_{eq}$  と定義する。

(3) 1回線3相しゃ断時は、正相回路により計算する。

ここで図3-3の送電限界電力  $P_m$  は、次式により算定される。[付3-2式参照]

$$P_m = \frac{V_s^2}{2(X_{eq} + X_M)} \quad (3-3)$$



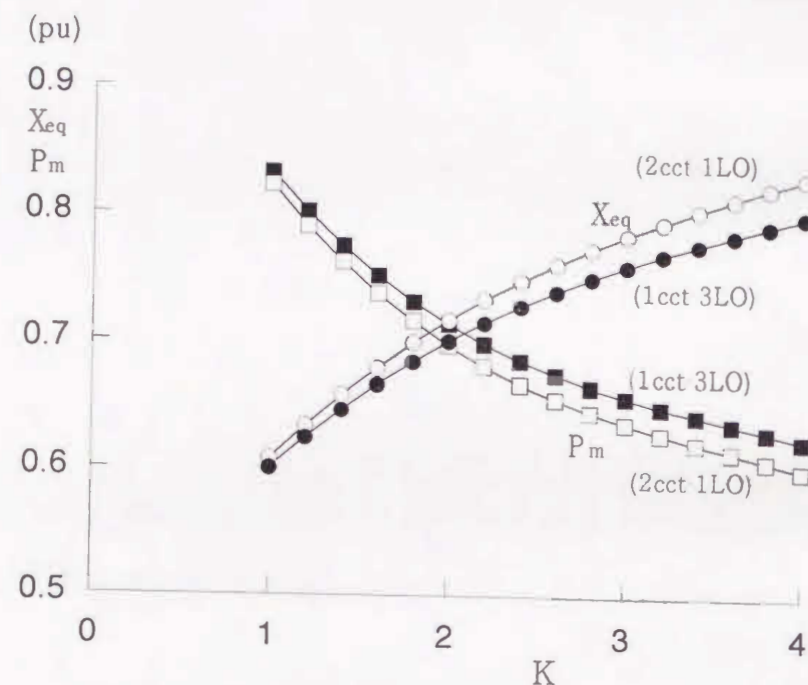


図3-3 等価正相リアクタンスと限界電力

図3-3より次のことがわかる。

- (1) 2回線同相1相しゃ断は、1回線3相しゃ断と比較して送電限界電力が小さく、 $X_{eq}$ が大きい。
- (2) 送電線のインピーダンスの比率が大きくなるほど、両者の送電限界電力および $X_{eq}$ の差は、大きくなる。

すなわち、負荷の定電力特性を仮定すると、系統不平衡となる2回線同相1相しゃ断の方が、系統が平衡状態である1回線3相しゃ断より電圧安定度が厳しく、健全な送電線Ⅱが送電線Ⅰに対してインピーダンスが大きくなるほど、言い換えれば送電線の単位長当りのインピーダンスが等しいとすると距離が長くなるほど電圧安定度の差が広がると言える。

以上は、静的な観点からの検討結果であり、これより系統不平衡状態が電圧安定性に与える影響の基本的な知見を得ることができた。

しかし、電力系統における進行速度の速い現象に対しては、負荷の動特性等を考慮した検討が必要であり、また、負荷の電圧特性が電圧安定性に与える影響も大きいとされている。[12][15][16]

このため、以下には、系統不平衡状態も含めた動的電圧安定性に関する実験により明らかにした事項について述べる。

### 3. 動的電圧安定性に関する基礎実験

系統の故障種別等の系統条件や負荷の特性が、系統の動的電圧安定度ならびに電圧不安定現象の進行速度に与える影響を明らかにし、故障送電線の再閉路による電圧安定性の維持効果と再閉路時の現象を把握することなどを目的として、以下の基礎実験を実施した。

#### 3.1 実験回路の構成

系統および負荷モデルを下記とし、図3-4のように実験回路を構成した。

- (1) 系統モデル：不平衡故障を含む系統の動的な電圧安定性についての基本的な特性を把握するため、送電線2ルート、1電源-1負荷のモデルとする。
- (2) 負荷モデル：負荷の動特性、代表的な電圧特性を実験に反映できるようIM



(軸負荷特性は定トルク特性)、エアコンおよび抵抗負荷を使用し、単体あるいは、これらを組み合わせて系統負荷をモデル化する。

使用したIMとエアコンの仕様を表3-2、表3-3に示しておいた。なお、エアコンは単相3台を△結線し回路に接続する。

### 3.2 実験方法

以下により実験を行った。

#### (1) 故障条件と再閉路

送電線I(短距離)を対象とし、故障条件は不平衡故障を含め次の3通りとした。

- (a) 1回線3相しゃ断 (1cct-3LOと略記)
- (b) 2回線同相1相しゃ断 (2cct-1LOと略記)
- (c) 2回線3相しゃ断 (2cct-3LOと略記)

さらに再閉路を実施する場合は、高速度再閉路として、上記しゃ断後1秒以内で再閉路する。

#### (2) 負荷条件

IMのみ、およびIMと他の負荷との組み合わせとして、次の3通りとした。

- (a) IM
- (b) IM+エアコン
- (c) IM+抵抗負荷

表3-2 誘導機の定格

定 格	
相	3相
電 圧	220 V
出 力	7.5kW
周 波 数	60 Hz
極 数	4極
滑 り	3.89%

表3-3 エアコンの定格

相	単相
定格電圧	100 V
定格周波数	50/60 Hz
電動機の定格消費電力	0.85/1.05kW
力率	89/95%
定格冷房能力	2.150/2.350kcal/h

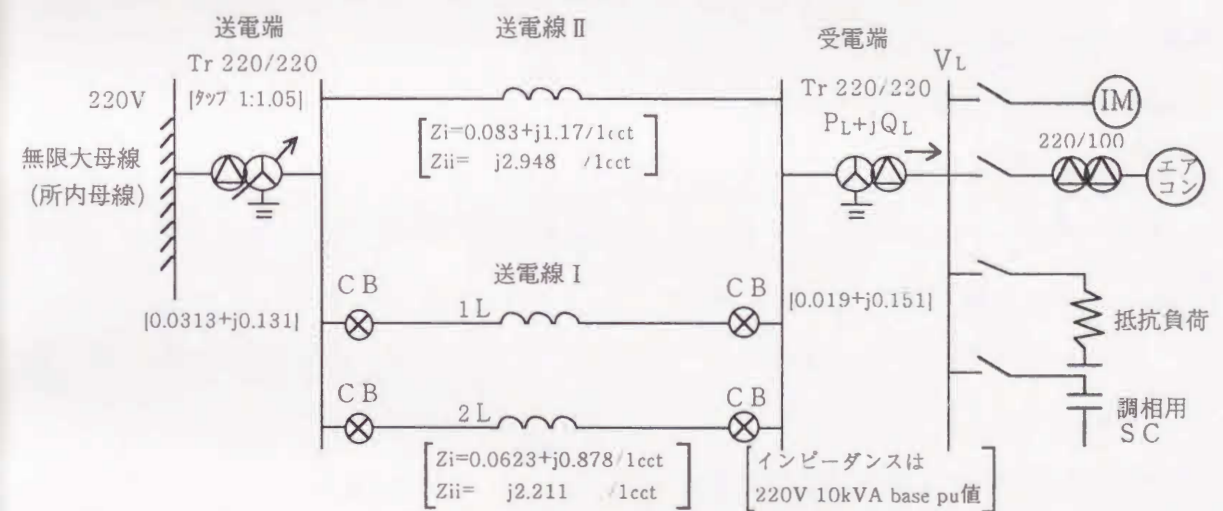


図3-4 実験回路構成



なお、今回の実験ではIM+抵抗負荷の場合、負荷の構成比は、IM：抵抗負荷を6：4程度とする。[10] しかし、IM+エアコンではエアコンの消費電力を任意に変化できず構成比を一定にできないため、組み合わせているIMの負荷電力を増加させていき安定送電限界を求めることとする。

### (3) 初期条件

系統故障発生前の平常状態では、受電端の負荷力率が100%に近い状態となるよう調相用コンデンサ（SCと略記）を並列しておく。

## 4. 実験結果

### 4.1 動的電圧安定度

動的電圧安定度を、ここでは安定送電限界電力 $P_c$ （故障発生前の負荷端子有効電力）により評価することとし、実験結果を故障条件および各負荷条件ごとにまとめ図3-5に示した。なお実験時の負荷構成状態がわかり易いよう、各負荷ごとに凡例の模様で区分し表示した。

実験結果は、つぎの通りである。

#### (1) 故障条件と電圧安定度

(a) 負荷条件がIMのみのケースにおいて電圧安定度は、故障条件について以下の順位で

1cct-3LO ( $P_c=4.94\text{kW}$ )

⇒2cct-1LO ( $P_c=4.59\text{kW}$ )

⇒2cct-3LO ( $P_c=3.24\text{kW}$ )

安定送電限界電力が小さくなり、電圧安定度が厳しくなる結果が得られた。

(b) IMとエアコンおよびIMと抵抗負荷を組み合わせた負荷条件においても、電圧安定度は、上記の故障条件の順位で厳しくなることがわかった。この結果は、2ルートの送電線で構成したループ系統において、短距離送電線の1回線3相しゃ断の平衡故障より系統が不平衡となる2回線同相1相しゃ断の方が電圧安定度が厳しくなるというこれまでの検討結果と一致しており、また、IMに負荷の電圧特性の異なるものを組み合わせても同様の傾向となることが、本実験で明らかにできた。

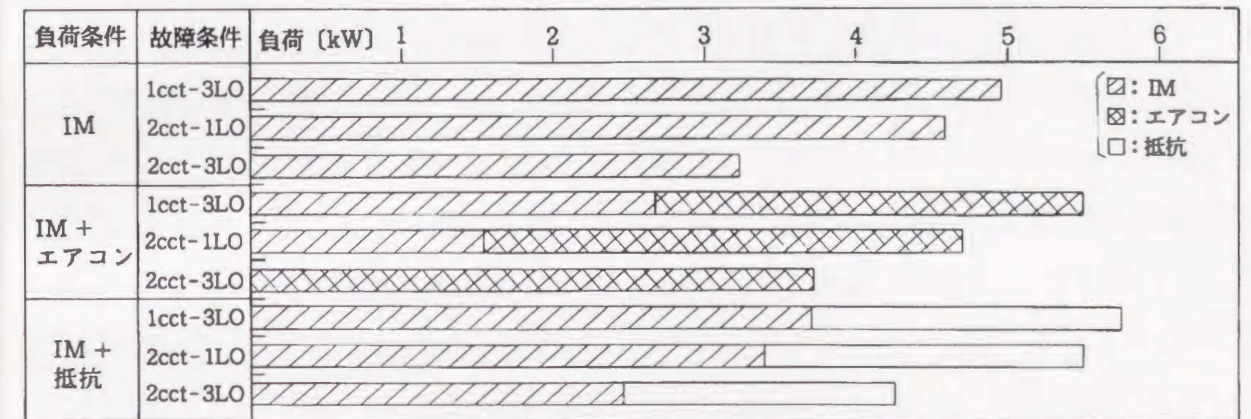


図3-5 安定送電限界負荷電力

#### (2) 負荷条件と電圧安定度

(a) 各負荷条件において故障条件が、1cct-3LOのケースの電圧安定度を比較すると、図3-5からわかるように、

IM+抵抗⇒IM+エアコン⇒IM

という順位で安定度が厳しい。

(b) 故障条件が2cct-1LOならびに2cct-3LOのケースでも電圧安定度の厳しさは、上記と同じという実験結果が得られた。

この結果については、負荷特性が電圧安定性に与える影響という観点から次節で考察する。



#### 4.2 送電線再開路の効果

多相再開路方式を適用している送電線では、一般に2回線にまたがる故障時でも相異なる2相が健全であれば再開路が実施される。

前述の実験と同様に故障対象の送電線をしゃ断し、約0.92秒の無電圧時間において、しゃ断送電線を再開路した場合のIMのみの実験結果を図3-6に示した。

なお、再開路をしない場合と比較し易いよう図3-5のIMのケースを再記するとともに、通常、再開路されない2cct-3LOの故障条件についても、他の故障条件時との比較等のため実験し結果を図示した。

(1) 故障条件ならびに負荷条件と電圧安定度の関係は前述の図3-5の実験結果と同じであった。

(2) 再開路を実施した場合、再開路無し(図3-5の実験結果)に対して、送電限界電力はIMのみのケースで6%~17%程度高く電圧安定度が向上することがわかった。

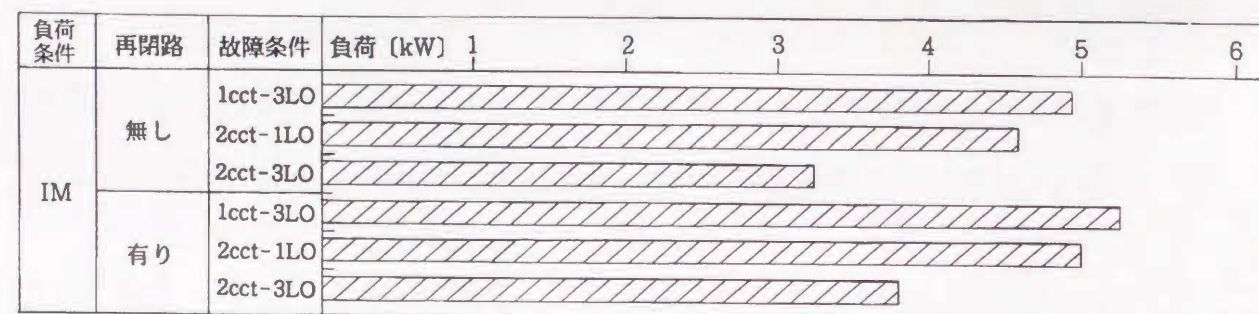


図3-6 送電線再開路の効果

#### 5. 考察

##### 5.1 負荷の電圧特性が電圧安定性に与える影響

前述の実験結果において、IM+エアコンのケースの方が、IM+抵抗のケースより電圧安定度が厳しかった。この実験結果例から負荷の電圧特性が電圧安定性に与える影響について考察する。

##### (1) 電圧安定度

本実験で使用したエアコンは従来型のものであり、その電圧特性を検討した結果、次式における電圧特性係数 $\alpha$ が

$$P = P_0(V/V_0)^\alpha \quad (3-4)$$

ここで、 $P$ ：有効電力、(添字の0は、定常状態を示す。)

$V$ ：端子電圧、(添字の0は、定常状態を示す。)

$\alpha = 0.36$  程度であり、定電力特性と定電流特性の中間にあつて定電力に近い特性を有していることがわかった。

ここで、図3-5のIM+エアコン負荷の安定ケースとIM+抵抗負荷の安定ケースにおける負荷総合の電圧特性をIMを定電力特性とし、IMの負荷に占める比率を用いて表わすとそれぞれ(3-5)式、(3-6)式のようになる。

$$P = 0.44 P_0 + 0.56 P_0(V/V_0)^{0.36} \quad (3-5)$$

$$P = 0.64 P_0 + 0.36 P_0(V/V_0)^2 \quad (3-6)$$

今、計算例として $P_0 = V_0 = 1$  [pu]とし、電圧 $V$ が $V = 0.8$  [pu]に低下したとして、負荷電力を求めると、IM+エアコン負荷の場合は(3-5)式から、 $P \approx 0.96$  [pu]となる。一方、IM+抵抗負荷の場合は(3-6)式から、負荷電力は $P \approx 0.87$  [pu]となり前者の方が大きい。従つて、IM+エアコン負荷のケースの方は、図3-5からもわかるようにIMの負荷全体に占める比率が後者より少ないにもかかわらず、電圧の



変化に対する負荷変化量の少ない定電力に近い特性であったため、負荷総合としての電圧特性の影響により、電圧安定性の面で厳しい結果が出たと考えられる。

## (2) 電圧不安定現象の進行速度

電圧不安定現象の進行速度に影響を与える負荷側の要因として、負荷の慣性や電圧特性等の負荷特性と負荷電力の大きさが考えられる。後者については、系統構成や故障種別等の系統側条件および負荷特性が一定とした場合、平常状態の負荷電力が、故障発生後の送電限界電力より大きくなればなるほど、急速に電圧崩壊していくことが容易に推測される。

ここでは、前者のうち(1)との関連から負荷の電圧特性が電圧不安定現象の進行速度に与える影響について、今回の実験結果の中から、故障条件と平常時の負荷電力が、ほぼ同一であったケースにより考察する。表3-4は、上記(1)の負荷条件で故障条件が1cct-3LOで不安定となったケースにおける電圧低下幅の経時変化を示したものである。同様に表3-5は、負荷条件がIMとIM+エアコンの比較で、故障条件が、2cct-1LOのものである。

表3-4 電圧低下幅(1)

時間(秒) 負荷条件	0.0~0.5	0.5~1.0	0.0~1.0	備考 負荷電力(kW)
IM+エアコン負荷	36.1	51.3	87.4	5.96
IM+抵抗負荷	31.0	16.8	47.8	6.09

単位：V

表3-5 電圧低下幅(2)

時間(秒) 負荷条件	0.0~0.5	0.5~1.0	0.0~1.0	備考 負荷電力(kW)
IM+エアコン負荷	36.7	19.2	55.9	4.98
IM+抵抗負荷	35.8	5.8	41.6	5.01

単位：V

表3-4、表3-5から次のことがわかる。

- (a) 故障発生時点の0秒から最初の0.5秒間の電圧低下幅は、31V~37V程度でそれほど差異はないが、その後の0.5秒間の電圧低下幅は各ケースで相当異なっている。
- (b) 表3-4から1秒間トータルの電圧低下幅は、負荷総合の電圧特性が定電力特性に近いIM+エアコンの方が40V程度大きく低下している。
- (c) 表3-5から1秒間トータルの電圧低下幅は、定電力特性を有するIMの方が、定電力と定電流特性の中間適特性を示すエアコンとIMの混合負荷より、15V程度大きく低下している。

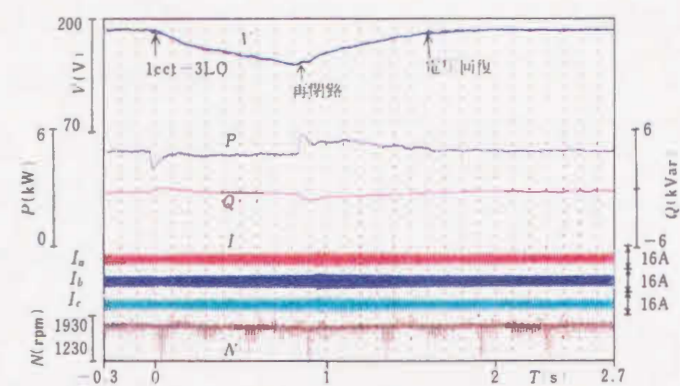
上記の1秒間と言う単位時間における電圧低下幅が大きいということは、言い替えば電圧が低下していく速度が速いという事に他ならない。

以上のことから、系統条件と負荷電力が同じで、負荷の動特性(慣性等)に大きな差異がなければ、負荷総合の電圧特性が定電力特性に近いほど電圧不安定現象の進行が速くなると考えられる。

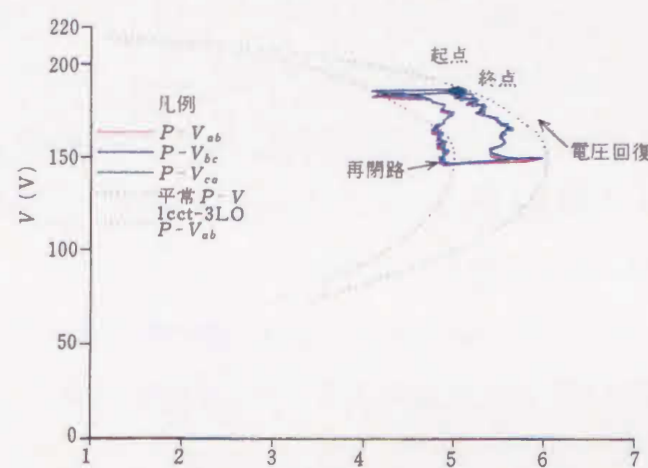
## 5.2 再閉路実施ケースの現象

図3-7は、負荷条件がIMのみで、故障発生前の負荷有効電力が5.26kW、故障条件が1cct-3LO、再閉路により安定となったケースのオシロとP-V軌跡およびQ-V軌跡である。また、図3-8は、負荷条件がIMのみで、故障発生前の負荷有効電力が、5.25kWと図3-7とほぼ同等で、故障条件が2cct-1LO、再閉路で不安定となったケースのものを示している。

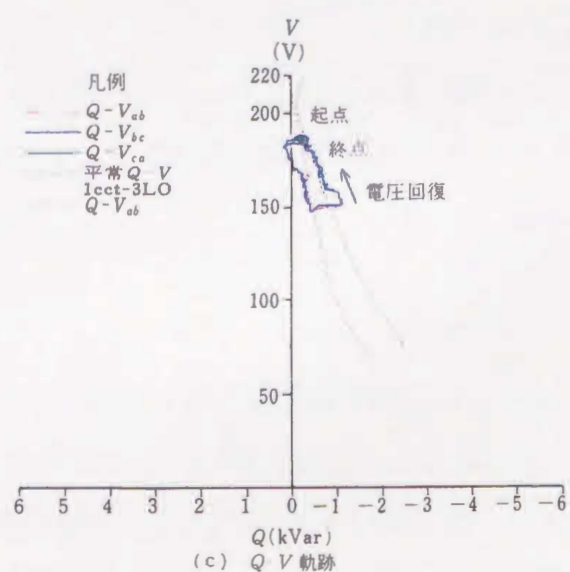




(a) 電圧、電流、電力波形

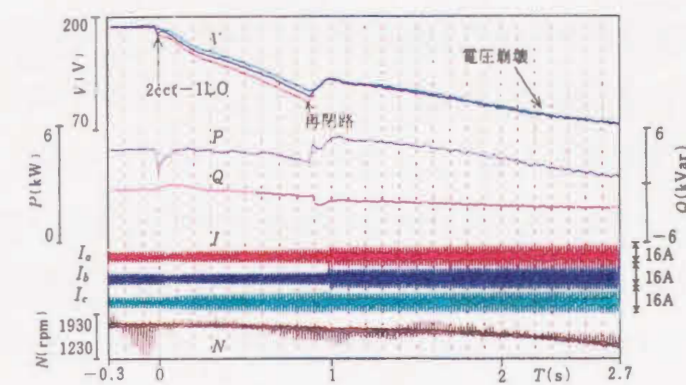


(b)  $P$ - $V$  軌跡

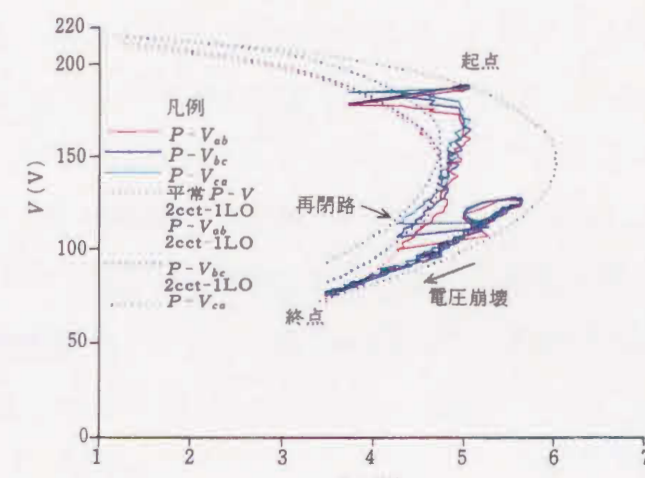


(c)  $Q$ - $V$  軌跡

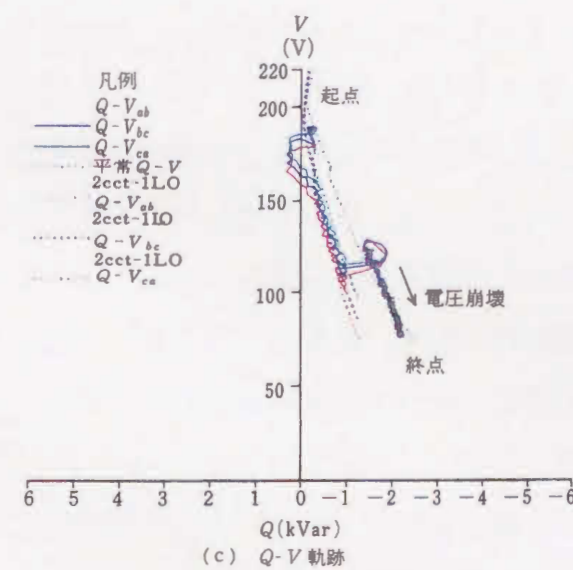
図3-7 実験結果：1回線3相しゃ断・再閉路（安定）



(a) 電圧、電流、電力波形



(b)  $P$ - $V$  軌跡



(c)  $Q$ - $V$  軌跡

図3-8 実験結果：2回線1相しゃ断・再閉路（不安定）



両者を比較しながら、再閉路時の現象を中心に考察する。なお、図中には、定常運転状態および送電限界付近でIMの機械的負荷を少し増加し不安定な状態にして求めた負荷P-V曲線[17]と負荷Q-V曲線も示している。

まず、図3-7の場合、送電線のしゃ断による系統インピーダンスの急増により、受電端電圧 $V_R$ が低下する。負荷IMには慣性があり、すべりは瞬時には変化しないので、図3-7のP-V軌跡からわかるように負荷の有効電力は、定インピーダンス的な特性で減少し、同時に無効電力（遅相）も減少するため、並列SCの進相分と総合した負荷端子の無効電力が進相となっていることが、Q-V軌跡からわかる。この瞬時の変化後、IMがすべりを増し、負荷が回復していくに伴い $V_R$ が低下していくが、 $V_R$ の低下が大きく、IMの機械負荷要求に見合う有効電力が得られず、不安定現象が進行していく。

送電線はしゃ断から約0.92秒後に再閉路されるが、この時点では、受電点の運転状態は負荷P-V曲線の限界付近にあることがわかる。再閉路によりP-V曲線は外側に膨らみ、運転点は平常時P-V曲線上に瞬時に移動し、過渡現象でIMは動揺するが、その時運転点はP-V曲線の高め解側に推移しており、起点付近の安定な運転点にゆっくり移動し平衡している。

これに対し図3-8の不安定ケースでは、系統不平衡に起因して各相電圧がアンバランスとなっており、瞬時に減少した負荷電力が大きいことから、前者より系統故障条件が厳しいものであることがうかがえる。

再閉路の時点では、負荷P-V曲線の低め解領域に相当入り込んでおり、再閉路により負荷の有効電力と無効電力（遅相）が急増していることが図よりわかる。再閉路により移動した運転点および過渡現象後推移した点ともに平常時P-V曲線の低め解領域に入り込んだ運転点であり、負荷のIMにとっては不安定な状態であるため、すべりの増加→有効電力の減少→受電端電圧低下というメカニズムで電圧不安定現象が進行し電圧崩壊に至ることが同図からわかる。

従って、両者の比較から、電圧安定性維持のための一方策として再閉路を考慮する際には、負荷特性など種々の条件により再閉路の効果が異なるものの、再閉路後の運転点が平常時の負荷P-V曲線の限界電圧以上となる条件を得ることが必要と考える。

## 6. まとめ

系統不平衡状態を含めた、動的電圧安定性に関する基本検討および基礎実験により、送電線の1回線3相しゃ断より一見して安定と考えられがちな2回線同相1相しゃ断の不平衡故障の方が電圧安定度が厳しくなることが明らかとなった。

今回の実験では、誘導電動機や抵抗負荷とともにエアコンも使用した。実験結果から、負荷特性が電圧安定度や電圧不安定現象の進行速度に与える影響について考察し、負荷総合の電圧特性が定電力特性に近いほど進行速度が速くなるなど得られた知見を示した。また、故障送電線の再閉路実施の効果を示し、再閉路時の電圧回復過程あるいは電圧崩壊過程の過渡現象の特徴、各課程の進行メカニズムを明らかにした。

以上のように、本章の基本検討ならびに基礎実験と考察から、従来の研究では知られていなかった系統不平衡状態の方が平衡状態より安定性が厳しくなるという電圧安定性に関する基本的特性を把握することができ、今後の過渡的な電圧安定性問題の研究に有用な新しい知見を得ることができた。



## 第4章 過渡電圧安定限界と系統電圧の安定化制御方式の検討

### 1. まえがき

系統の安定性の向上という観点から、系統電圧の安定化制御が重要な課題となっている。長距離送電線で電力供給される負荷系統の母線では、最近観測されたような過渡的な電圧崩壊現象が発生する恐れがあり、過渡電圧安定性に系統の送電可能電力が制約されることが考えられる。このため、過渡的な電圧不安定現象を防止し、母線電圧の安定化をはかる制御方式の開発が強く要請されている。

過渡的な電圧不安定現象は、前述の実験結果からもわかるように、その進行速度がきわめて速いという特性があり、従来から適用されている電力用コンデンサの投入方式では、遮断機の制御動作に時間を要し電圧安定化効果が小さい。従って、過渡電圧の安定化には、制御応答がきわめて速いパワーエレクトロニクス応用機器の適用が有効と考えられる。[18][27][28]

本章では、過渡電圧限界の基礎的な解析を行い、電圧安定化の観点から、系統の電源電圧と受電端設備の制御方法を検討する。さらに、電圧安定性を向上し送電限界電力の増大をはかるための制御として、過渡領域における安定化能力を向上させる新しい過渡電圧安定化制御方式を提案し、その有効性を検討する。また、一般に、負荷系統と呼ばれている系統には、需要に対して小規模な電源が存在する場合も含まれていることから、こうした発電機の電圧安定化効果についても明らかにする。

### 2. 過渡電圧安定限界

自系統内に発電機がないか、あるいは、あっても負荷と比較して発電機容量が少ない負荷系統では、発電機のような能動的な無効電力供給源が乏しいため電圧維持能力が弱く、送電線事故などにより負荷母線から見た系統側インピーダンスが急増すると過渡電圧不安定現象が発生することが考えられる。特に、長距離送電線により電力が供給されている負荷系統では、送電線事故が大きな系統外乱となり過渡的に電圧崩壊する恐れがある。



そこで本節では、こうした負荷系統の典型的なモデルである図4-1に示すモデル系統を対象に、過渡電圧安定性の検討に用いる解析方法を示し、過渡電圧安定限界について基礎的な解析を行う。

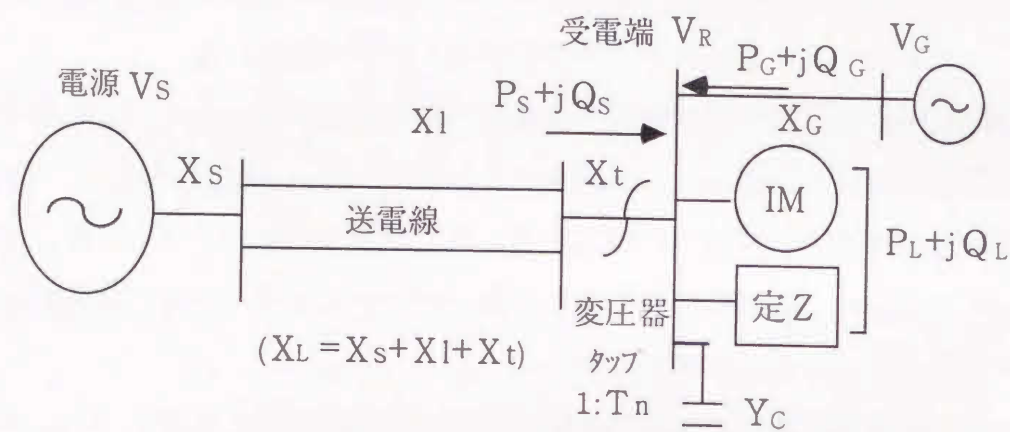


図4-1 モデル系統

## 2.1 過渡電圧安定性の基礎的解析方法

過渡的な電圧崩壊現象は、系統負荷や発電機の動特性の影響を受けることから、その解析にあたっては動的シミュレーション手法を用いるのが一般的であるが、ここでは、負荷P-V曲線[17]の概念を導入し、以下に示すシステム方程式を解いて、受電端の運転点とシステムの平衡点の関係から、過渡電圧安定性を検討する基礎的な解析方法を用いることとする。

[システム方程式]

図4-1のモデル系統を受電端の負荷母線に注目して定式化すると、システムの方程式は次のように表現できる。

(負荷母線の電圧・電力方程式)

$$(X_L P_s)^2 + (X_L Q_s + V_R^2)^2 - V_s^2 V_R^2 = 0 \quad (4-1)$$

$$(X_G P_G)^2 + (X_G Q_G + V_R^2)^2 - V_G^2 V_R^2 = 0 \quad (4-2)$$

$$P_L - P_s - P_G = 0 \quad (4-3)$$

$$Q_L - Q_s - Q_G - Q_C = 0 \quad (4-4)$$

$$Q_C - Y_C V_R^2 = 0 \quad (4-5)$$

(負荷方程式)

$$P_L - P_{em} - G_R V_R^2 = 0 \quad (4-6)$$

$$Q_L - Q_{em} - B_L V_R^2 = 0 \quad (4-7)$$

$$P_{em} - \frac{R_m S}{R_m^2 + S^2 X_m^2} V_R^2 = 0 \quad (4-8)$$

$$Q_{em} - \frac{X_m S^2}{R_m^2 + S^2 X_m^2} V_R^2 = 0 \quad (4-9)$$

$$\frac{dS}{dt} - \frac{1}{I\omega_0^2} \left[ \frac{P_m}{1-S} - P_{em} \right] = 0 \quad (4-10)$$



各記号の意味は、

$V_s$  : 電源電圧,  $X_L$  : 系統リアクタンス,  $V_R$  : 負荷端子電圧,  $P_s$  : 電源からの有効潮流,  $Q_s$  : 無効潮流,  $Y_c$  : 調相設備サセプタンス,  $P_L$  : 負荷有効電力,  $Q_L$  : 無効電力,  $P_{em}$  : 誘導機有効電力,  $Q_{em}$  : 無効電力,  $R_m$  : 抵抗,  $X_m$  : リアクタンス,  $I$  : 慣性,  $\omega_0 (=2\pi f_0)$ ,  $f_0$  : 系統周波数,  $S$  : すべり,  $P_m$  : 誘導機機械負荷,  $G_R$  : 負荷のコンダクタンス,  $B_L$  : サセプタンス,  $X_G$  : 発電機から負荷端端子間リアクタンス,  $V_G$  : 発電機端子電圧,  $P_{ge}$  : 有効電力,  $Q_G$  : 無効電力(負荷端子) である。

ここで、電源側は大規模系統とし、短絡リアクタンス $X_s$ 背後の無限大母線を仮定する。負荷系統内の発電機については、発電機の有効電力と端子電圧を初期設定時の $P$ ,  $V$ 指定値に固定する。また、負荷は、動特性を有する誘導機負荷と定インピーダンス負荷との混合負荷モデルとして定式化している。

## 2.2 過渡電圧安定限界の解析

### (1) 負荷 $P-V$ 曲線とシステムの平衡点

負荷 $P-V$ 曲線は、与えられた系統条件と負荷条件下において、状態変数の内、動的負荷である $IM$ のすべり $S$ のみを独立変数として変化させシステム方程式(但し(4.10)式は除く。)を解いて求めた $P-V$ 平面上の運転点の集合である。すなわち、受電端のある運用状態における運転点は必ずこの曲線上に存在することを意味している。

以下では、議論を容易にするため負荷系統内に発電機が存在しないと仮定しておく。この場合は、前述の(4-1)式から(4-10)式で発電機に関する諸量を零とおいて解析できる。

図4-2は、2回線送電線が1回線開放(1cct-3LO)されたときの受電端の有効電力 $P_L$ と端子電圧 $V_R$ の関係を示した負荷 $P-V$ 曲線の例である。図のように負荷 $P_L$ を構成している $IM$ のすべり $S$ を大きくしていくと負荷 $P_L$ が増加し、最大の点(ノーズポイント)に達した後は負荷 $P_L$ が減少していく特性をもっている。

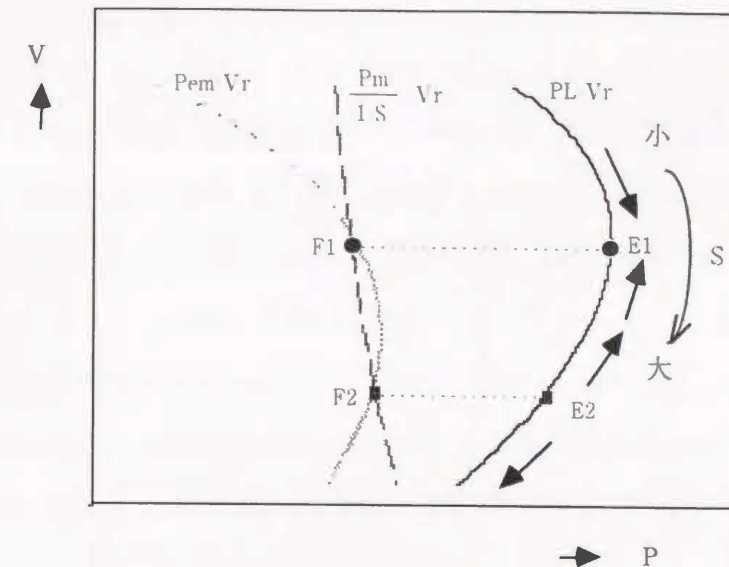


図4-2 負荷 $P-V$ 曲線と平衡点

次に、負荷 $P-V$ 曲線と同様に与えられた系統条件と負荷条件下でシステムの平衡点を求める。平衡点においては、 $IM$ のすべり $S$ の時間的変化がないことから、 $IM$ の運動方程式である(4-10)式の左辺を零とおき、システム方程式を解いたときの根が平衡点をあたえる。例えば、図4-2では、負荷 $P-V$ 曲線上に点 $E1$ 、 $E2$ の2つの平衡点が存在している。

以下に、平衡点の特性について考察してみよう。図4-2には、 $IM$ の入力と受電端電圧の関係および $IM$ の機械負荷を $(1-S)$ で除した量と $V_R$ の関係を表した曲線が示してある。2曲線の交点 $F1$ 、 $F2$ は、 $IM$ の入出力が平衡し運動方程式(4-10)式の右辺が零となる時の点である。図からもわかるように曲線 $P_{em} \cdot V_R$ 上で点 $F1$ から点 $F2$ 間(但し、この2点は除く。)では、誘導機負荷の入力が機械的負荷より大きいことから、すべり $S$ の時間的変化が負( $dS/dt < 0$ )である。

一方、点 $E1$ 、 $E2$ は、求めた経緯から曲線 $P_{em} \cdot V_R$ 上で端子電圧 $V_R$ が同じ値である点 $F1$ 、 $F2$ に対応することが明らかである。従って、曲線 $P_L \cdot V_R$ 上では点 $E1 \sim$ 点 $E2$ 間(この2点は除く)のみ、 $dS/dt < 0$ ということになる。



まず、点E1近傍の運転点を考える。受電端電圧 $V_R$ が点E1の電圧より高い運転点では、前述から $dS/dt > 0$ であり、運転点は点E1に向かい点E1で平衡する。逆に受電端電圧が点E1より低い運転点は、 $dS/dt < 0$ であり、同様に点E1で平衡する。すなわち、点E1は安定平衡点である。これに対し、点E2近傍の運転点では、受電端電圧 $V_R$ が点E2より高い運転点は、 $dS/dt < 0$ であり、点E1に移動して平衡するが、受電端電圧 $V_R$ が点E2より低い運転点は、 $dS/dt > 0$ であり、運転点は電圧が低い方向へ移動し電圧が崩壊する。すなわち、点E2は不安定平衡点である。

以上の考察から、平衡点が2つ存在すれば、電圧が低い方の平衡点が不安定平衡点であり、これより電圧が高い運転点では電圧が安定化され、低い運転点は電圧不安定となることから、この平衡点が安定と不安定の境界であることがわかった。

## (2) 過渡電圧安定限界

P-V平面において、上述の平衡点と負荷P-V曲線上のある時点における運転点との関係から、準動的にシステムの安定性を論ずることができる。つまり、系統変化後の負荷P-V曲線上の不安定平衡点の電圧と系統変化直後、初期運転点が負荷P-V曲線上に移動した点の電圧を比較することにより、過渡的な電圧安定性の判別ができるのである。

以下には、負荷が増加していった場合の過渡電圧安定限界について検討してみよう。図4-3の曲線Aは、図4-2の例のように送電線1回線開放後の負荷P-V曲線上に2つの平衡点があり、系統変化直後、初期運転点が→印のように負荷P-V曲線上に移動する。この時の運転点電圧は不安定平衡点の電圧よりも高く、その後、運転点は安定平衡点へ移動し電圧は安定である。

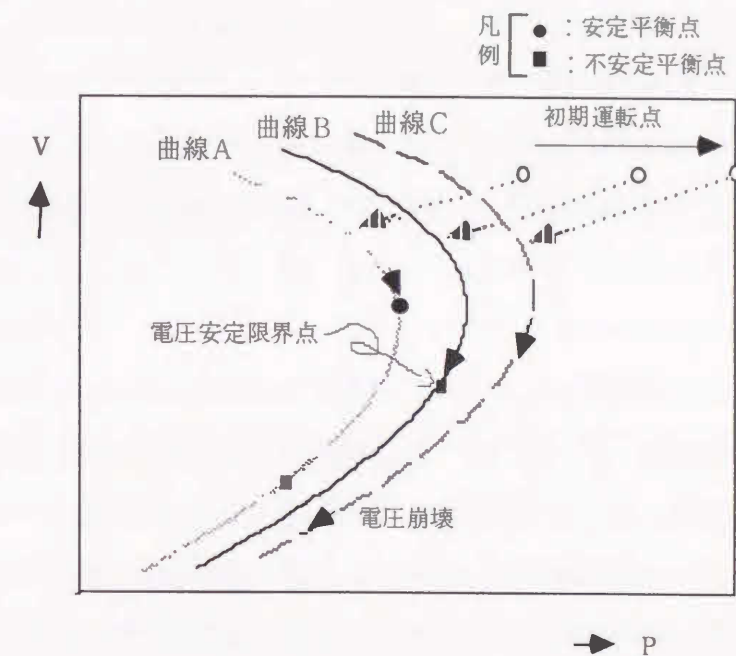


図4-3 電圧安定限界

次に、受電端電圧が一定となるよう調相容量を調整しながら負荷を増加させ、初期運転点を変えた場合の負荷P-V曲線を描いていくと、やがて図4-3の曲線Bのように平衡点が1つになる。この平衡点は、安定平衡点と不安定平衡点が重なった状態であり、図のように系統変化後の運転点がとどまることのできる唯一の点であることは、前述(1)の考察から明らかであろう。同様の条件で、これ以上、初期負荷を増加させると安定平衡点がなくなり、図の曲線Cのように系統変化直後の運転点の移動先によらず電圧が崩壊してしまう。従って、ここで仮定した条件においては、曲線Bの場合が過渡電圧安定限界とすることができる。曲線B上の平衡点は、送電線1回線開放時の過渡的な電圧安定限界点である。また、この限界点が、静的P-V曲線や負荷がIMのみの場合の限界点がノーズポイントであるのに対し、負荷P-V曲線の低め解側にあるのは、負荷を混合負荷モデルとしたためである。



図4-3の場合の検討例により、過渡電圧安定限界について述べたが、系統変化後の負荷P-V曲線上の平衡点の有無や数、系統変化直後の運転点の位置は、所与の条件により定まるものであり、一般に、過渡的な電圧安定限界は、その条件下で議論すべきものであることには注意を要する。

以上、本節では、過渡電圧安定性の基礎的な解析方法を示し、これにより過渡電圧安定性の判別ができることを明らかにした。また、過渡電圧安定限界の基礎的な解析例により、負荷の増加が過渡電圧安定性の面で厳しくなることを示した。

### 3. 電圧安定化の基礎的検討

電力系統の送電容量が電圧安定性により制約を受けることから、系統の送電容量の増大をはかる上で過渡電圧の安定化が重要な課題である。

一方、電力系統では、発電機や受電端の変圧器のタップ、調相設備を制御し、母線電圧が、常時ある一定の範囲内の電圧になるように運用されている。

本節では、系統運用制約を考慮し、過渡電圧安定性の向上という観点から見た、電源電圧と受電端設備による安定化の方法ならびに、負荷系統内に発電機が存在する場合の発電機の電圧安定化効果について、前節で述べた電圧安定性の解析方法を用いて検討する。

#### 3.1 電源と受電端設備による電圧安定化

図4-1のモデル系統で負荷系統内の発電機がない場合を考える。ここでは、系統運用制約の下で、過渡電圧安定化の観点から、電源電圧 $V_s$ 、受電端の変圧器タップ $T_n$ 、調相設備(SC)容量が過渡電圧安定性に及ぼす影響について検討し、電圧安定化に有効な方法を見出す。

なお、検討の際、受電端の連系変圧器のタップが $T_n$ が $T_n \neq 1$ の場合は、(4-1)式の $V_s$ を $T_n$ 倍し、連系変圧器の1次側から電源側をながめたリアクタンスを $T_n^2$ 倍して(4-1)式に代入すれば、変圧器モデルを定式化した場合と等価となり、上述のシステム方程式により受電端における解析が可能となる。

#### (1) 検討方法と条件

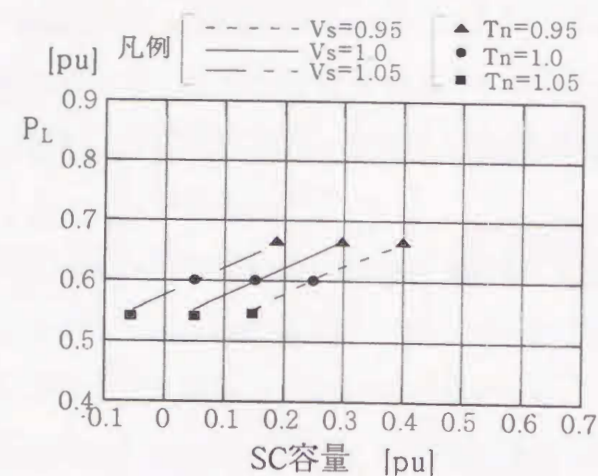
過渡電圧安定限界について、長距離送電系統を考慮し次の条件下で検討する。

- (a) 図4-1で系統のリアクタンスは、 $X_s=0.1[\text{pu}]$ 、 $X_l=0.5[\text{pu}]$ (送電線1回線あたり)、 $X_t=0.2[\text{pu}]$ とする。
- ここで、 $X_l=0.5[\text{pu}]$ は、系統電圧187kV、1000MVAベースで、送電線をTACSR-410<sup>2</sup>(4導体)を想定した場合、送電線距離は約50kmに相当し、長距離送電線といえる。
- (b) 送電線の1回線開放を系統外乱として与えた場合の過渡電圧安定限界となる送電限界電力(送電線開放前の受電端の負荷有効電力 $P_L$ )を指標とする。
- (c) 系統運用制約は、送電線開放前の平常状態における受電端電圧を一般的な電圧運用範囲である0.95[pu]から1.05[pu]の範囲内に設定する。
- (d) このため、電源電圧、変圧器タップ、および受電端の目標電圧 $V_{\text{ref}}$ をパラメータとし、調相設備容量(電力用コンデンサ(SC)のサセプタンス $Y_{c0}$ )の調整により初期設定する。但し、 $Y_{c0}$ は0.01単位で調整する。従って、受電端電圧と $V_{\text{ref}}$ との間に多少の誤差が生じることもあるが許容することとする。
- (d) 負荷条件は、負荷全体に占めるIMの比率を60%とし、 $R_M=0.05[\text{pu}]$ 、 $X_M=0.2[\text{pu}]$ (自己容量ベース)とした。

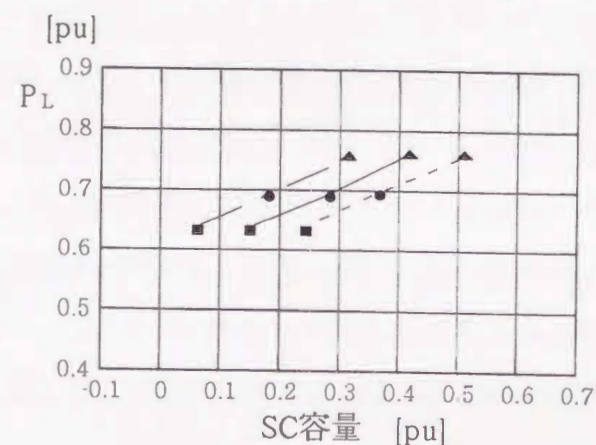
#### (2) 検討結果

検討結果を受電端の目標電圧ごとにまとめ図4-4に示す。

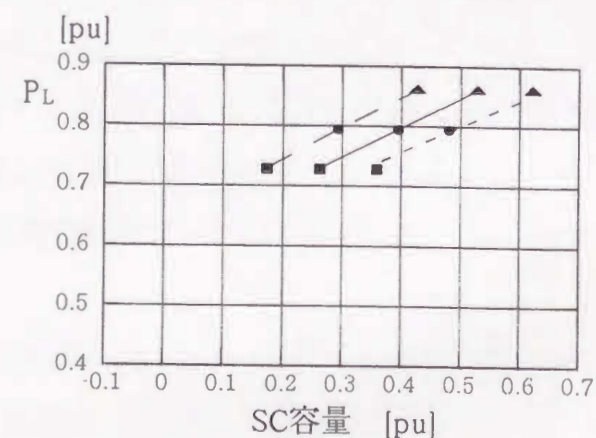




(a) 受電端目標電圧=0.95[pu]



(b) 受電端目標電圧=1.0[pu]



(c) 受電端目標電圧=1.05[pu]

図4-4 系統パラメータと安定限界電力

これより電源電圧 $V_s$ 、受電端の変圧器タップ $T_n$ 、調相設備(SC)容量および負荷条件と過渡電圧安定限界の関係について次のことがわかる。

- (i) 図4-4の(a)から、電源電圧 $V_s$ が一定とすると、変圧器のタップ $T_n$ を小さく(負荷側下げ)し、SC容量を増加すれば送電限界電力が増大する。
- (ii) 目標電圧 $V_{ref}$ を上げた(b)、(c)でも同様のことがいえる。
- (iii) 目標電圧 $V_{ref}$ を高くしていくとSC容量が増加し、送電限界電力が増大していく。
- (iv) SC容量が一定、変圧器のタップ $T_n$ がほぼ同じとして、図4-4の(a)~(c)を見ると、電源電圧 $V_s$ が高いほど送電限界電力が大きくなる。

以上より、

- ・ 受電端の目標電圧を高めを設定すること。
- ・ この目標に対し、まず、電源電圧を高く維持すること。
- ・ 受電端では、変圧器のタップよりもSCを優先し、SCを多く投入していくこと。

が過渡的な電圧安定化に有効な方法であることがわかった。

電源電圧を高く維持することは、設備計画においてSC容量の低減という観点からも重要である。また、系統運用面では、この方法を電圧安定化の予防制御に反映し、系統事故発生後に高速な安定化制御を行えば効果的に過渡電圧安定性を向上することができると考えられる。但し、目標電圧を電圧運用の上限付近とした場合、変圧器のタップを下げれば、受電端変圧器の電源側電圧が運用上限を超過する可能性があるため注意を要する。

### 3.2 系統内発電機の電圧安定化効果

過渡電圧安定性の向上という観点から、負荷系統内に小容量発電機がある場合の電圧安定化効果について、発電機がない場合と比較し検討する。

[検討条件]

検討の条件は以下の通りである。

- (a) 図4-1のモデル系統で $X_c=1.5$ [pu]とし、その他の条件は、前項と同じとする。
- (b) 初期設定条件は、表4-1に示した。



[検討結果]

検討結果として、図4-5に送電線1回線開放時における発電機なしの場合の受電端の負荷P-V曲線と発電機ありで発電機の端子電圧と有効電力を送電線解放前の値に固定して求めた負荷P-V曲線を示した。

図4-5の2つの負荷P-V曲線と平衡点から次のことがわかる。

表4-1 初期設定条件

	電源電圧	受電端			系統内発電機	
		電圧	負荷	調相容量	端子電圧	有効電力
発電機なし	1.05	1.047	0.60	0.19	—	—
発電機あり	1.05	1.049	0.60	0.18	1.05	0.045

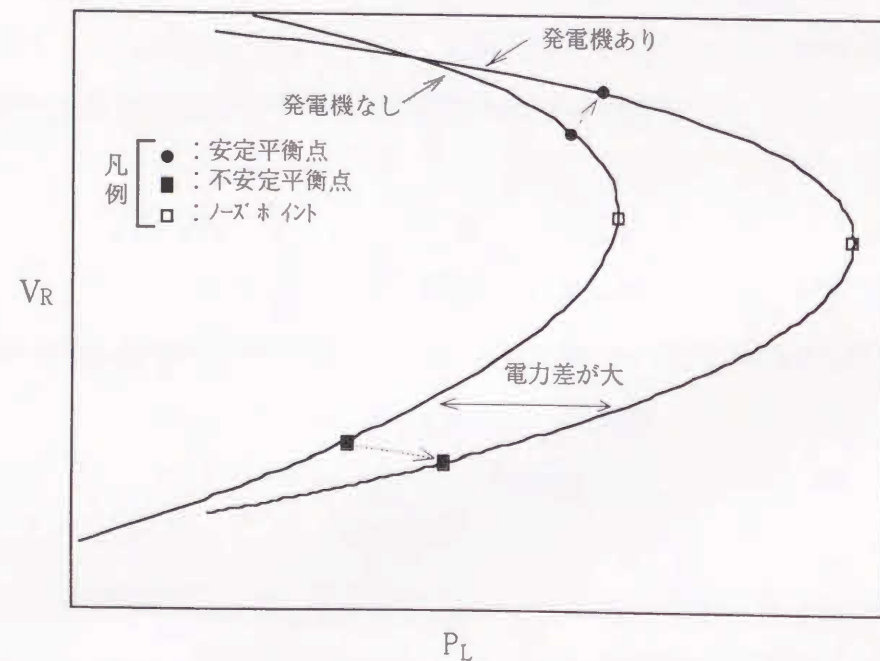


図4-5 受電端P-V特性の比較

(a) 発電機ありの場合の負荷P-V曲線は、発電機なしの場合と比較して、P-V曲線が外に膨らみ、ノーズポイントの電圧が低く、発電機なしのP-V曲線を電圧が低い方へ押し下げた曲線となっている。すなわち、電圧が低い状態でも2つの曲線の有効電力の差が大きく、発電機ありの場合の方が電圧安定化に有利な特性である。

(b) また、発電機ありの場合は、2つの平衡点が大きく離れていることから電圧安定性の面でまだ余裕があり、初期条件で負荷を増加させていることから電圧安定性の向上効果が期待できる。

ここでは、発電機の端子電圧と有効出力が送電線開放後も一定という仮定の下に検討した。しかし、系統外乱が大きい場合には、発電機の励磁系や慣性など動特性の影響が強く現れてくる。この点については後述の動的シミュレーション解析により検討、考察することとする。

#### 4. 新しい過渡電圧安定化制御方式

##### 4.1 基本的な考え方

前述の解析では、系統外乱は送電線の1回線開放として安定な送電限界電力を検討したが、送電線の地絡事故などにより母線電圧が大幅に低下するような系統事故が発生した場合には、前述の条件よりも電圧安定性がさらに厳しくなると考えられる。また、電源電圧と受電端の変圧器と調相設備(SC)の制御では、需要の増加に伴い、SCを増設していけば安定限界電力も増大していくが、SCの増加によりP-V曲線のノーズポイントが上昇していく特性があるため、平常時の受電端電圧の運用制約からやがて限界に達する。[10] こうした条件下においても過渡的な電圧崩壊を防止し、電圧安定性の維持、向上をはかっていくには、系統事故発生後に過渡領域の電圧を安定化する制御方式が必要である。

過渡的な電圧崩壊現象は進行速度が速い特性を持っていることから、その電圧安定化には、通常の遮断機を用いるSCの高速投入制御では0.2~0.3秒程度の動作となり効果が少ないため、10msオーダーの制御が可能なパワーエレクトロニクス技術の応用が有効と考えられる。従来より、電圧安定化の制御に静止形無効電力補償装置



(SVC)等が適用されている。[18] しかし、系統事故除去直後の受電端電圧は大幅に低下していることから、SVCのSCが供給する無効電力は平常時と比較して電圧の2乗に比例して低下している。このため、送電線の1回線開放では、電圧安定化できても、大幅な電圧低下を伴う送電線の3相地絡と事故送電線の1回線開放時には、電圧崩壊してしまう場合もあり、過渡電圧の安定化には多量のSC設備が必要となってくる。

そこで、サイリスタ制御コンデンサ(TSC)とTSC用の変圧器を組み合わせ、電圧低下時に変圧器のタップを瞬時切り替えして、過渡電圧の安定化をはかる新しいサイリスタ制御コンデンサ方式(ATSC: Advanced Thyristor Switched Capacitor)を提案する。

## 4.2 本制御方式による過渡電圧安定化の原理

### (1) 本制御方式の概要

ATSCの構成概要を図4-6に示した。ATSCの変圧器のタップは2つとした。タップ①は、定常時用のタップであり母線電圧が定格付近の電圧の時のタップである。タップ②は、電圧が大幅に低下している過渡領域用で、TSC側の電圧を昇圧するためのものであり、これによりTSCのSCの無効電力の供給能力を高める。すなわち、本制御方式は、系統事故発生後の電圧安定化の過程において、この2つのタップをサイリスタで瞬時切り替え制御することにより、電圧の安定化をはかる方式である。[28]

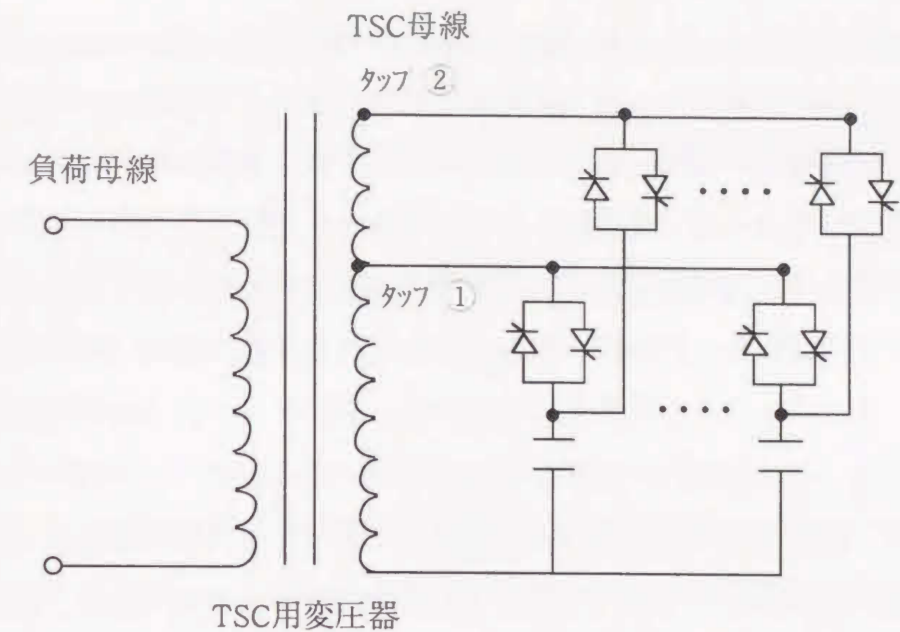


図4-6 ATSCの構成概要図

また、SVCが、リアクトルを有し電圧の位相制御により無効電力を変化させるのに対し、TSCはSCバンクのオン、オフにより無効電力を制御する。両者を比較するとTSCには、次のような利点がある。

- (a) 設備としてリアクトルが不要となる。
- (b) SCバンクのオン、オフ制御のため高調波が発生せず、SVCで必要な高調波対策が不要である。

しかしながら、従来のTSC方式では、各SCバンクの容量が一定であり、SVCのように無効電力を連続的に変化させることができず電圧をスムーズに制御できないという欠点があった。

そこで、本方式では、一部のSCバンク群の容量を、ある容量を基準に2のべき乗( $2^{-n}$ )で低減していき制御時の最小変化容量を細かくすることにより、SVCに近い連続的な制御性能が得られるよう従来のTSC方式を改良することとした。



## (2) 本制御方式による過渡電圧安定化の原理

図4-7の $P-V$ 平面上で、本制御方式による過渡電圧安定化の原理を示す。送電線の3相地絡のように大幅な電圧低下を伴うような系統事故が発生した場合には、受電端の運転点は電圧、有効電力とも大きく低下する。動的負荷であるIMでは、機械負荷要求に見合う電力が得られず事故継続中に減速し低力率の状態となり、事故送電線が開放された瞬間の無効電力消費が、事故発生前より大きくなる。このため事故除去後の運転点の軌跡は、送電線開放のみの場合の運転点軌跡が、前述図4-3で見られたように負荷 $P-V$ 曲線の外側から曲線上の電圧高め解側に移動するのとは異なり、図4-7のように電圧、有効電力が非常に小さい点から、負荷 $P-V$ 曲線の内側を移動して曲線上の電圧低め解側に達する。従って、大幅な電圧低下を伴うような系統事故時は、送電線開放のみの場合と比較して電圧安定性の面で厳しい状態となることがわかる。

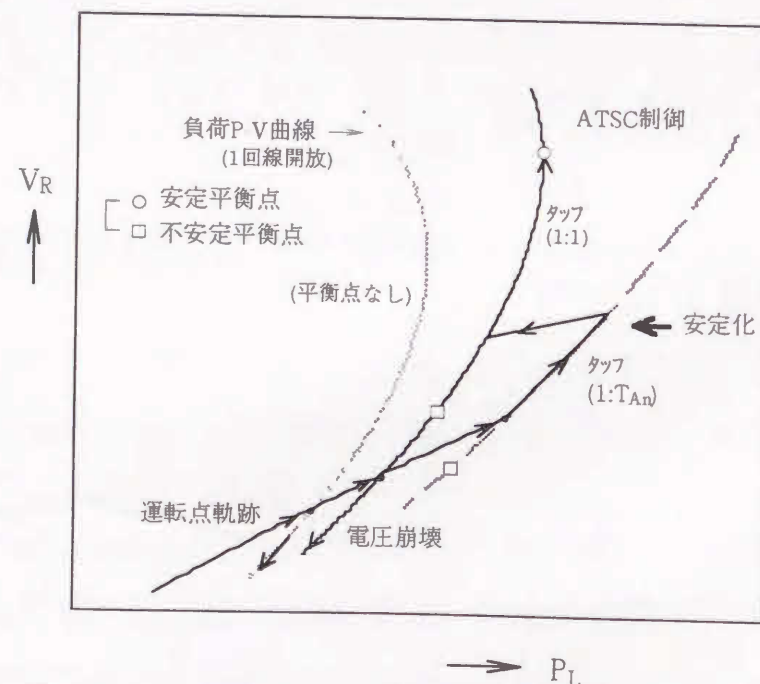


図4-7 本制御方式による過渡電圧安定化の原理

ここで、系統事故除去後の負荷 $P-V$ 曲線上に平衡点が存在しない場合を想定すると、制御なしの時には負荷 $P-V$ 曲線上に達した運転点は、その後、電圧が低い方へ移動し図のように電圧崩壊してしまう。この対策として、事故除去直後に、一定量のSCが投入されると、図のように負荷 $P-V$ 曲線が膨らみ平衡点が得られる状態となる。しかし、ここで投入されたSC容量が少なく過渡的な電圧安定化に不足していたと仮定すると、SC投入後の負荷 $P-V$ 曲線上に達した運転点は、不安定平衡点より電圧が低い不安定側であり電圧崩壊する。

これに対し、本制御方式では、サイリスタによりTSCのSC容量制御と同時に、変圧器のタップを電圧低下時のタップ②に制御しTSC側の電圧を昇圧する。この制御により、電圧低下時の無効電力の供給能力が向上し、TSCのSC容量が先のSC投入量と同容量であっても図のようにSC容量を増量したのと等価な状態となるため、負荷 $P-V$ 曲線がさらに膨らむとともに運転点を不安定平衡点より安定側に移動させることができるのである。その後、運転点は電圧が高い方へ移動していくが、ここでタップを電圧低下時のものから、平常時のタップ①へ切り替え制御すると、運転点はSC投入後の負荷 $P-V$ 曲線上で不安定平衡点より電圧が高い安定側へ移動し、安定平衡点へ向かい電圧が安定化される。

以上のように、提案した過渡電圧の安定化制御方式では、電圧低下時においてもSCが定格電圧付近で有している無効電力の供給力を引き出すことにより、過渡的な電圧崩壊を防止し、電圧の安定化をはかるのである。従って、電圧の安定化に必要なSVCのSC容量より少ない容量でSVCと同等の電圧安定化効果を得ることが期待できる。

## (3) 本制御方式の特長

提案した過渡電圧の安定化制御方式の特長をまとめると次のようになる。

- (a) サイリスタを使用し高速な電圧安定化制御ができる。
- (b) 変圧器タップ切り替え制御により電圧低下時でも無効電力の供給能力が高い。
- (c) このため、従来のSVCより少ないSC容量で過渡的な電圧崩壊を防止し、電圧の安定化をはかることができる。



- (d) SVCと比較し、変圧器タップが2つのためサイリスタ容量が増加するものの、TSC方式の採用によりリアクトルが不要であり、SC容量も低減できるので主要設備の軽減が期待できる。
- (e) SCバンク郡の容量の改良によりSVCに近い準連続的な制御ができ、高調波が発生しない。

## 5. 動的シミュレーション検討

電圧崩壊の電圧安定化について、基礎的な解析方法により検討を行ってきた。しかし、過渡的な電圧不安定現象は負荷や発電機、制御系の動特性の影響を受けるため、厳密には動的解析により検討しておく必要がある。特に、送電線の地絡事故が発生したような場合には、系統電圧が大幅に低下するため、動特性の影響が顕著に現れる。

そこで本節では、過酷な系統外乱を対象とし、前述の

- (a) 基本的な電圧安定化方法の確認
  - (b) 提案したATSCによる過渡電圧安定性の向上効果
  - (c) 負荷系統内発電機の過渡電圧安定化効果
- について動的シミュレーション解析による検討を行うこととする。

### 5.1 動的シミュレーション検討方法

動的シミュレーション検討における解析手法と検討時の共通条件は以下の通りとし、検討対象の内容による個別的な条件については後述する。

#### (1) 動的シミュレーション解析手法

以下の検討における解析手法としては、一般の電力系統の動特性解析に用いる時間領域のシミュレーション手法を適用する[29]。ここで、発電機モデルはParkの同期機D-Q座標系モデルを基本とし、これを一部修正拡張したものを用いる。また、誘導機についても同期機と同等のモデルとする。

#### (2) シミュレーション検討時の共通条件

共通条件は次の通りである。

##### (a) 系統

検討の対象とする系統は、前述図4-1のモデル系統とする。系統の計算諸言を表4-2に示した。

##### (b) 電源側の発電機

以下では、電源側発電機の動特性の影響を考慮するため、電源の発電機は一般的な大容量火力機モデルを用い、発電機定数を表4-3に示した。発電機の励磁制御系(AVRのみ)と調速器系(GOV)についても一般的なモデルを適用する。また、発電機端子電圧は、1.05[pu]とする。

##### (c) 負荷

IMと定インピーダンス負荷の混合負荷モデルとし、IM比率は60%とする。また、IMは詳細モデルとし、その平常時等価回路を図4-9に、定数を表4-4に示した。

##### (d) 系統事故条件

過酷な系統外乱を対象として検討することから、平行2回線送電線の1回線3相地絡と事故送電線の開放(1cct-3LGO)、事故継続時間は0.07秒とする。



表4-2 系統の諸言

単位[pu]

$X_s$	$X_l(1cct)$	$X_t$	$X_G$
0.1	0.5	0.2	1.5

(1000MVAベース)

表4-3 電源の発電機定数

$X_l$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_q$	$X_q''$	$T_d'$	$T_d''$	$T_q''$	$T_a$
0.225	1.70	0.35	0.25	1.70	0.25	1.00	0.03	0.03	0.40

(自己容量ベース)

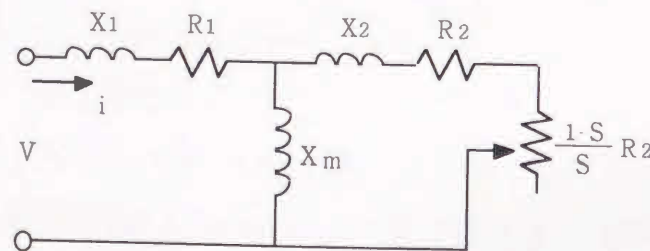


図4-9 IM等価回路

表4-4 IM定数

項 目	自己容量ベース [PU, S]
一次巻線抵抗 $R_1$ (二次 $\propto R_2$ )	0.05 [PU]
一次巻線漏リアクタンス $X_1$ (二次 $\propto X_2$ )	0.10 [PU]
励磁リアクタンス $X_m$	1.9 [PU]
慣性定数 $M$	1.0 [S]

## 5.2 電圧安定化方法のシミュレーション検討

電源電圧と受電端設備による過渡電圧の安定化方法について、3.1項では基本的な解析方法で検討した。送電線の3相地絡時には電源電圧も低下し過渡的な電圧安定性が厳しくなると考えられる。

ここでは、電源側発電機の動特性の影響も考慮し電圧安定化方法について検討する。電圧安定化効果は、前回と同様に電圧安定限界となる平常時の受電端の負荷有効電力 $P_L$ をその指標とし評価する。

## (1) 検討条件

以下の通りとする。

- (a) 負荷系統内の発電機はなしとする。
- (b) 系統事故前の電源の発電機端子電圧は1.05[pu]一定としパラメータとしない。
- (c) 受電端の電圧目標値  $V_{ref}$  (2種類: 1.0, 1.05 [pu]) と連系変圧器のタップ値 (3種類: 0.95, 1.0, 1.05[pu]) をパラメータとする。
- (d) 電圧限界を求めるために初期状態の受電端有効電力を増加させていくが、この際受電電圧がほぼ目標電圧となるよう調相容量を設定する。(但し、 $Y_{c0}$ の調整は0.01[pu]単位とする。)

## (2) 検討結果

検討結果を図4-10に示した。



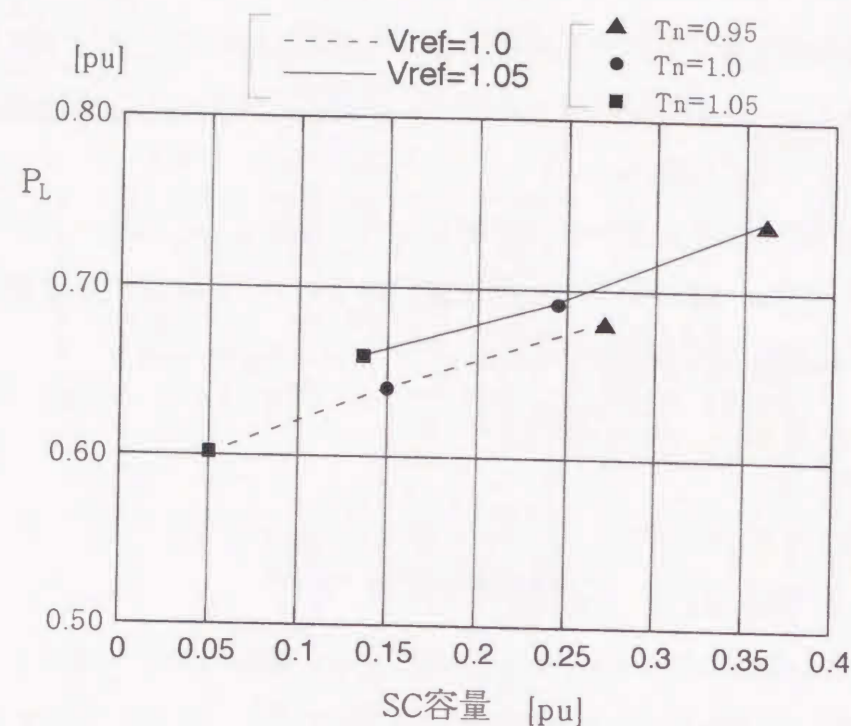


図4-10 電圧安定化効果

図より次のことがわかる。

- (1) 受電端目標電圧を一定とする、変圧器のタップ比率を下げ、調相容量(SC)を多くした方が電圧安定性が向上する。
- (2) 受電端の目標電圧を上げると電圧安定性が向上する。

すなわち、大幅な電圧低下を伴う系統外乱に対しても、3.1項の電圧安定化の方法と一致する結果が得られた。

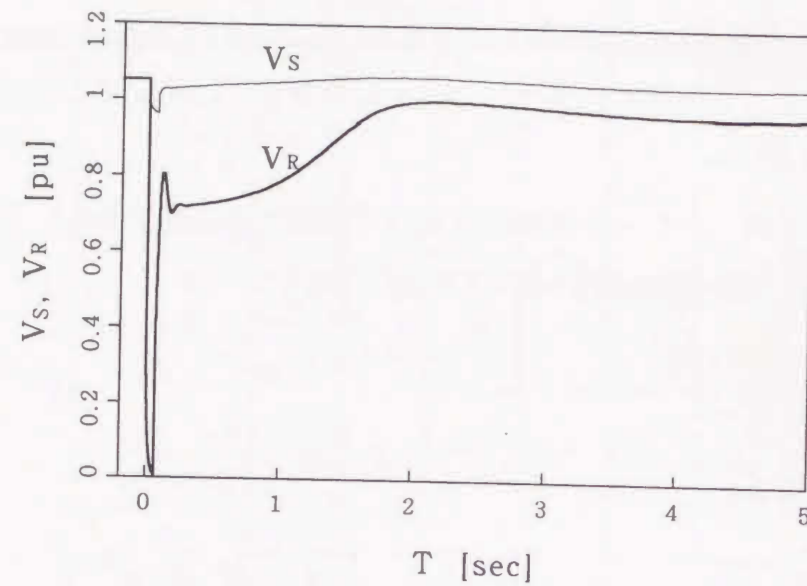
ここで、受電端の目標電圧1.05pu、変圧器タップ比が0.95puの場合は、変圧器1次側の電圧が電圧運用上限を超過することから目標電圧を運用上限付近とする場合には変圧器1次側電圧に注意が必要である。従って、控えめではあるが、受電端の目標電圧1.05puの電圧安定限界は、変圧器タップ比が1の限界容量を電圧安定限界

と見ておく方がよい。この意味で、モデル系統において、過酷な系統外乱である送電線の1cct-3LGOにおける最大の送電限界電力は0.69[pu]である。

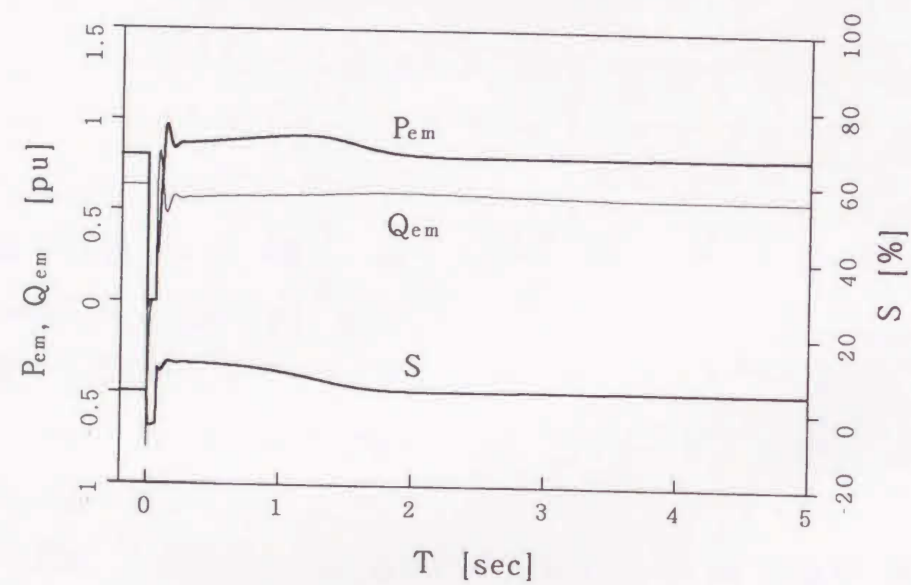
この限界電力は、検討条件等が若干異なるため厳密な比較にはならないものの、3.1項における系統外乱が送電線1回線開放とした時の送電限界電力0.79[pu]を大きく下回っており、3相地絡を伴うような系統事故時には過渡電圧安定性が厳しくなることがわかる。

また、動的シミュレーション解析による過渡領域の動揺波形例として、電圧安定の例を図4-11に、電圧崩壊の例を図4-12に示した。



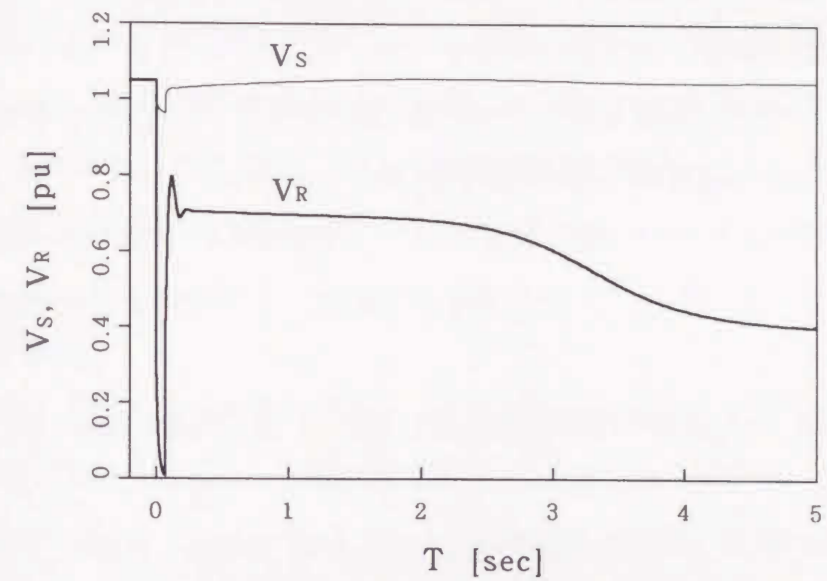


(a) 電源発電機電圧 $V_S$ , 受電端電圧 $V_R$

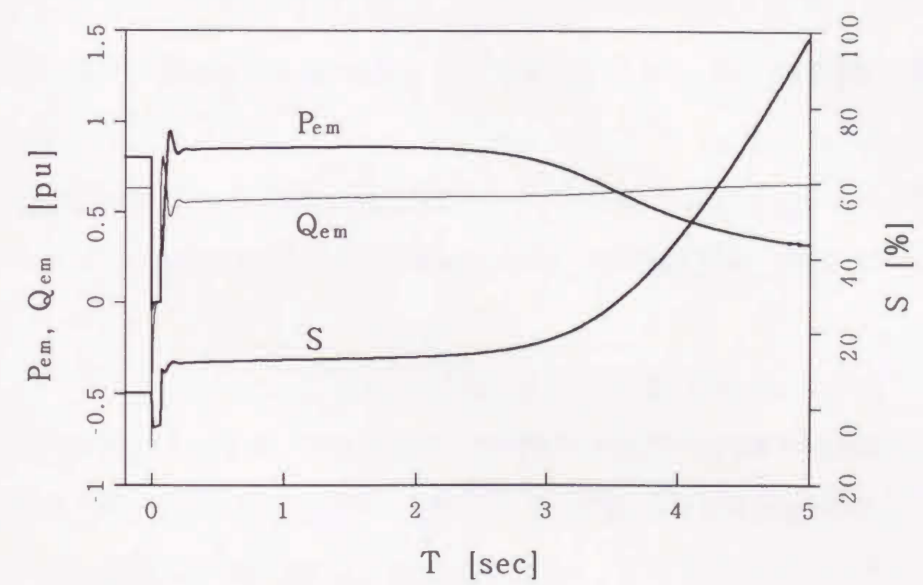


(b) IM有効電力 $P_{em}$ , 無効電力 $Q_{em}$ , すべり $S$

図4-11 電圧安定例 (負荷 $P_L=0.69, V_{ref}=1.05, T_n=1:1, Y_{C0}=0.24$ )



(a) 電源発電機電圧 $V_S$ , 受電端電圧 $V_R$



(b) IM有効電力 $P_{em}$ , 無効電力 $Q_{em}$ , すべり $S$

図4-12 電圧崩壊例 (負荷 $P_L=0.70, V_{ref}=1.05, T_n=1:1, Y_{C0}=0.24$ )



図4-11は、前述の安定な送電限界電力が最大となったケース( $P_L=0.69[\text{pu}]$ )であり、図4-12はこれより負荷を増加させたケース( $P_L=0.70[\text{pu}]$ )で電圧崩壊している。両図から次のことがわかる。

- (i) 電源発電機の電圧が、系統事故中に一時的に低下する。このため電源を無限大母線と仮定した場合より過渡的な電圧安定性が厳しくなる。
- (ii) 系統事故中の受電端電圧の大幅な低下で、事故除去直後のIMのすべりが初期状態より大きくなっている。このため事故除去直後、IMが多量の無効電力を消費している。
- (iii) (ii)により、事故除去直後の受電端電圧は、 $0.7\sim 0.8[\text{pu}]$ 程度の低い電圧までしか回復していない。
- (iv) 図4-11のケースでは、その後、電圧の安定化により受電端電圧が回復していくが、負荷を増加した図4-12のケースでは電圧が低下していき電圧崩壊している。
- (v) また、図4-12のケースでは電圧の低下に伴いIMのすべりが増加し停止していくことがわかる。

以上、本項の検討により、3.1項の基礎的な解析検討から導いた電圧安定化方法が、系統外乱が大きい厳しい条件下でも電圧安定化に効果があることが明らかとなった。また、過渡的な電圧安定性から見た、大幅な電圧低下を伴う系統事故時における図4-1のモデル系統の送電限界電力が $0.69[\text{pu}]$ であることを示した。

### 5.3 ATSCによる過渡電圧安定性の向上効果

電力系統の電圧運用制約を考慮した場合、需要の増加に対してSCを増設していても、5.2項の検討結果から、安定な送電電力が限界に達することがわかる。これ以上の負荷の増加に対応するには、系統事故除去後に電圧の安定化制御を行い過渡電圧安定性の向上をはかることが必要である。

過渡電圧の安定化のための新しい制御方式として、4.2項でATSCを提案した。ここでは、ATSCをモデル系統へ適用した場合の有効性について、従来方式のSVCと比較検討することとする。

#### (1) 検討方法

前項と同じ1機-1負荷モデル系統において、受電端負荷側にSVC、またはATSCを設置する。これらが設置されない時の送電限界電力は、電源発電機の初期電圧 $V_s=1.05[\text{pu}]$ 、受電端の目標電圧 $V_{\text{ref}}=1.05[\text{pu}]$ 、受電端変圧器タップ比(1:1)の条件下で $0.69[\text{pu}]$ であった。ここでは、さらに過渡電圧安定性の向上が必要となる負荷電力 $0.8[\text{pu}]$ まで安定送電するためのSVC容量とATSC容量について比較検討する。

#### (2) 検討条件

検討時の条件は以下の通りである。

- (a) 電源電圧 $V_s=1.05[\text{pu}]$ 、受電端変圧器タップ比(1:1)、受電端の目標電圧 $V_{\text{ref}}=1.05[\text{pu}]$ とする。このため、初期SCのサセプタンスは、 $Y_{c0}=0.30[\text{pu}]$ となる。
- (b) ATSC用およびSVC用変圧器のリアクタンスは、 $0.2[\text{pu}]$ とした。
- (c) ATSCの制御は、受電端負荷端子電圧を入力として安定化制御するもので、そのブロック図を図4-13に示した。ここで、ATSCは、SVCと同等の連続的な制御が可能と仮定し1次遅れモデルとした。また、電圧検出と制御には、正弦波1周期程度を要すると考えられるので、安全サイドとして、1次遅れの時定数 $T_c$ を $20\text{ms}$ とした。
- (d) また、ATSC用変圧器の電圧低下時のタップ比は、 $1:1.6$ とし、系統の事故除去後 $20\text{ms}$ から $120\text{ms}$ の間のみこの比率とし、それ以外は、 $1:1$ のタップ比とした。
- (e) SVCの制御ブロックは、ATSCの制御ブロックと同一とし、1次遅れの時定数 $T_c$ は $100\text{ms}$ とした。[18]
- (f) 次式で定義されるSVCのスロープリアクタンス $X_c$ を $4\%$ とし、制御ゲイン $G_c$ を設定した。また、ATSCも同様とした。

$$Q_c = \frac{V_R - V_{\text{Rref}}}{X_c} V_{\text{SVC}} \quad (4-11)$$

ここで、 $Q_c$ ：SVCの進相無効電力、 $V_{\text{Rref}}$ ：制御目標電圧、 $V_{\text{SVC}}$ ：SVC電圧



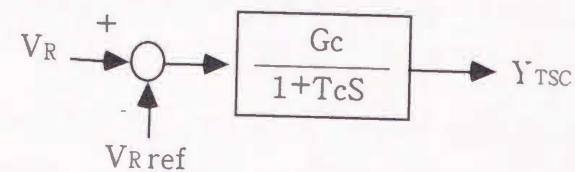


図4-13 ATSCの制御ブロック図

### (3) 検討結果

検討の結果は、次の通りである。

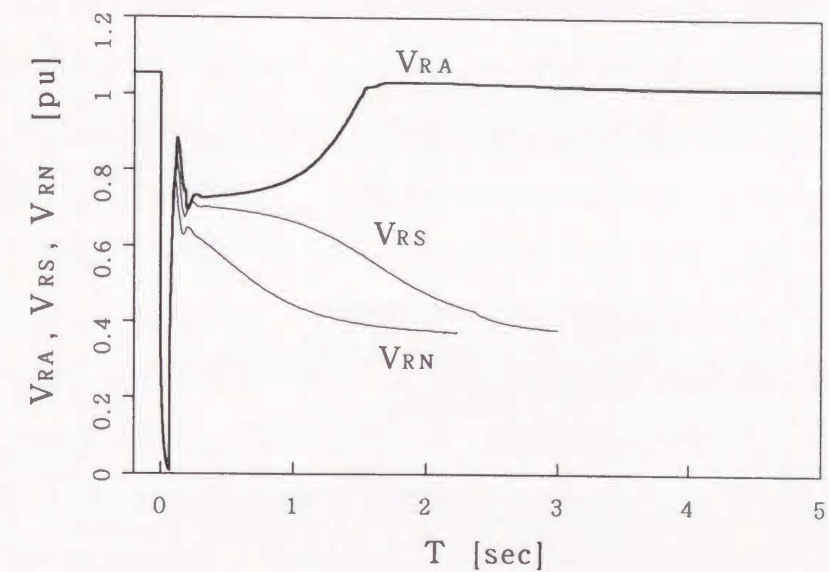
過渡電圧安定性を向上させ、送電限界電力を0.8[pu]まで増加させるために

(a) SVCでは、0.15[pu]の容量が必要であった。

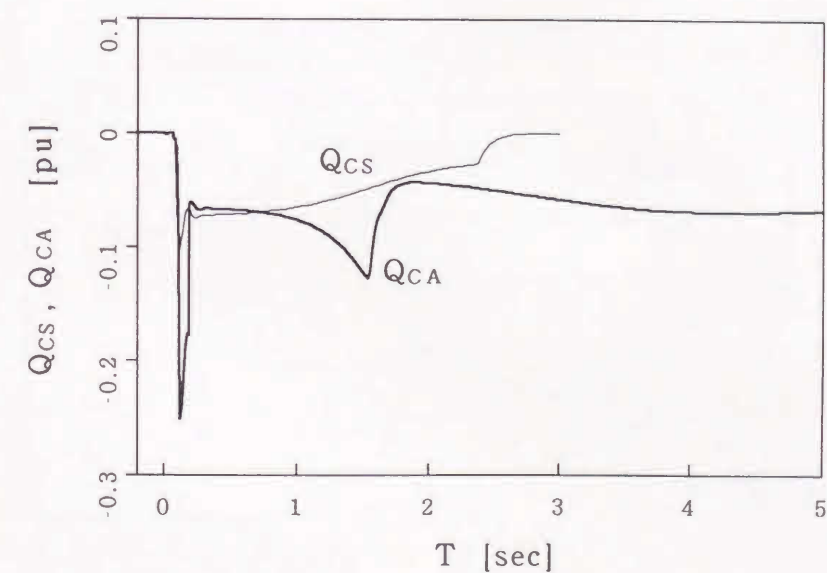
(b) これに対してATSCでは、0.12[pu]の容量で電圧を安定化することができた。

すなわち、ATSCは、SVCより少ない容量で過渡電圧を安定化できることが明らかとなった。

図4-14に、動揺波形を、また、図4-15にP-V軌跡とQ-V軌跡を示した。



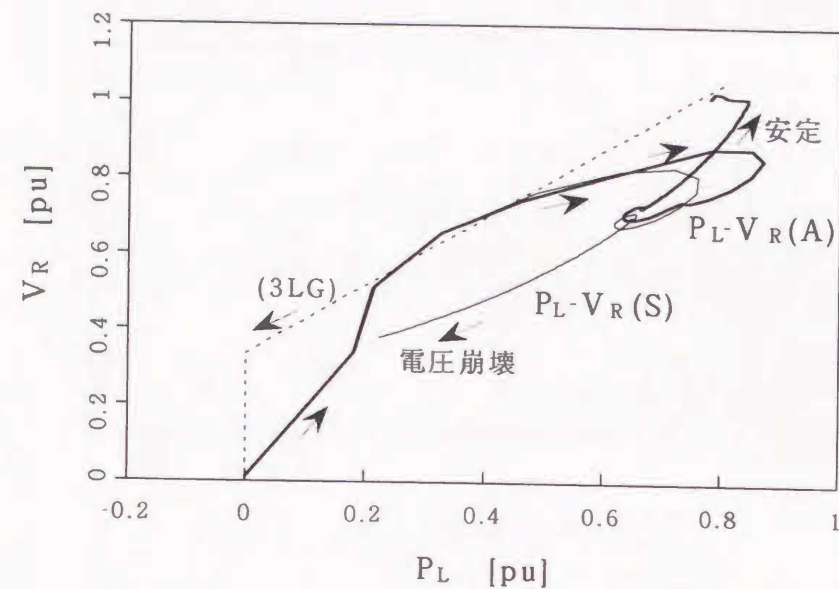
(a) 受電端電圧 $[V_{RN}(\text{制御無し}), V_{RS}(\text{SVC}), V_{RA}(\text{ATSC})]$



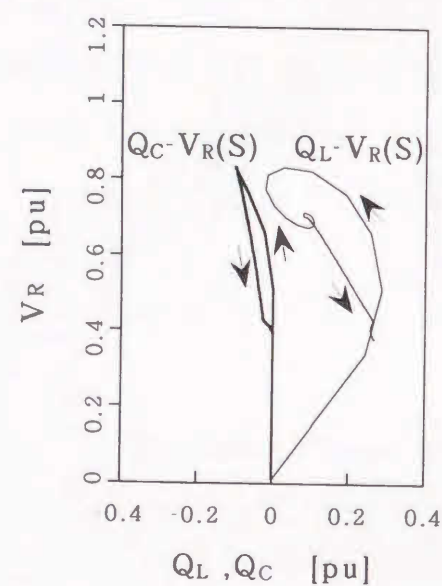
(b) 無効電力 $Q_{CS}(\text{SVC}), Q_{CA}(\text{ATSC})$

図4-14 SVCとATSCの比較 (動揺波形)

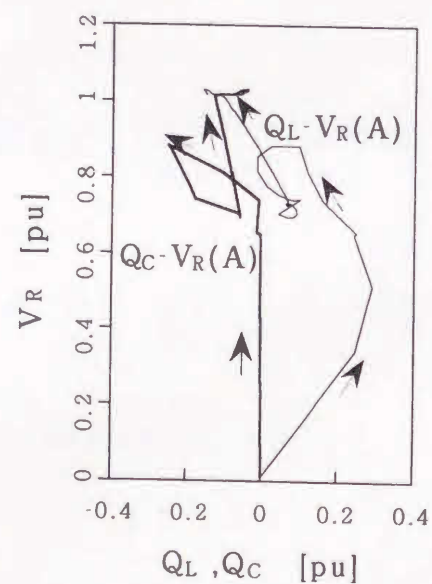




(a) 受電端P-V軌跡[S: SVC, A: ATSC]



(b) Q-V軌跡[SVC]



(c) Q-V軌跡[ATSC]

図4-15 SVCとATSCの比較[P-V軌跡, Q-V軌跡]

図4-14のシミュレーション波形は、制御なし：負荷電力0.7[pu]、SVC：負荷電力0.8[pu]で、SVC容量0.14[pu]、ATSC：負荷電力0.8[pu]で、ATSC容量0.12[pu]のケースである。図から、次のことがわかる。

- (i) 図4-14から、制御なしでは、事故除去後に受電端電圧が急速に低下し電圧崩壊している。
- (ii) SVCでは、制御なしよりさらに負荷が増加した状態であるが、事故除去直後、無効電力を供給するため、制御なしのケースより受電端電圧が高くなっている。しかし、無効電力が不足しているため、やはり電圧崩壊している。
- (iii) これに対し、ATSCでは、事故除去直後に、電圧低下時のタップ側で制御し多量の無効電力供給ができていたため、受電端電圧は安定化され、電圧が初期電圧付近に回復している。ここで、瞬時的なものであり、許容できると考えられるが無効電力が定格の2倍程度(TSC側電圧1.5[pu]程度)となっていることには注意を要す。
- (iv) 図4-15のP-V軌跡で事故除去後の最大電力が、ATSCの方がSVCのケースより大きくなっていることがわかる。
- (v) これは、ATSCとSVCで無効電力の供給量が異なり、また、これによる電圧変化により負荷の無効電力消費にも違いがあるのである。図4-15のQ-V軌跡で、事故除去直後の電圧0.8[pu]付近において、ATSCの方が無効電力の供給量 $Q_C$ が多く、これにより負荷の無効電力 $Q_L$ (初期設定時のSC分を含む。)が減少していることがよくわかる。



表4-5 主な設備容量の比較 [単位：MVA]

	変圧器	サイリスタ	リアクトル	容量
SVC	150	150	150	150
ATSC	120	196	—	120

表4-5には、この電圧安定化に必要な従来SVCとATSCの主要設備容量を示した。ATSCでは、サイリスタ容量がSVCより多くなるが、その他の設備容量を節減でき、特に、リアクトルが不要になるなど設備の低減をはかることができる。

本項では、提案した過渡電圧の安定化制御方式（ATSC）について、従来のSVCと比較し、ATSCでは、瞬時的な過負荷を伴うもののSVCより少ない容量で過渡電圧の安定化がはかれること、また、これにより、SVCより設備を低減できることを示し、本安定化制御方式の有効性を明らかにした。

#### 5.4 系統内発電機の電圧安定化効果

負荷系統内に小容量発電機があれば、発電機から負荷に有効電力が供給されるため、電源系統から眺めると定常状態では、等価的には負荷が減少したように見える。また、発電機は無効電力も発生することから、負荷系統内の電圧維持源としても働く。従って、負荷系統内に発電機がある場合は、発電機がない場合と比較して電圧安定性は向上すると考えられる。その基本的な効果については、3.3項において送電線1回線開放時のP-V特性により示した。しかし、そこでは、発電機の励磁制御系や慣性などの動特性については考慮していなかった。

本項では、送電線の3相地絡と事故送電線の開放による大きな系統外乱を対象に、系統内発電機の電圧安定化効果ならびに、系統内発電機とATSCによる安定化効果について検討する。このため、負荷系統内の発電機やその励磁制御系を詳細に模擬することが必要となる。

ここでは、負荷系統内の発電機は小容量の水力機とし、表4-6に発電機定数を、図4-16に励磁制御系のブロック図を示した。励磁機は水力機によく見られる自励式のサイリスタ励磁方式[26]とし、制御系には、AVRの他に、界磁巻線の過負荷の可能性も考えられることから、簡易的な過励磁制限（OEL）を付加している。GOV系については、一般的なモデルとした。

表4-6 負荷系統内の発電機定数

$X_l$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_q$	$X_q''$	$T_d'$	$T_d''$	$T_q''$	$T_a$
0.160	1.00	0.23	0.18	0.60	0.18	1.20	0.03	0.03	0.20



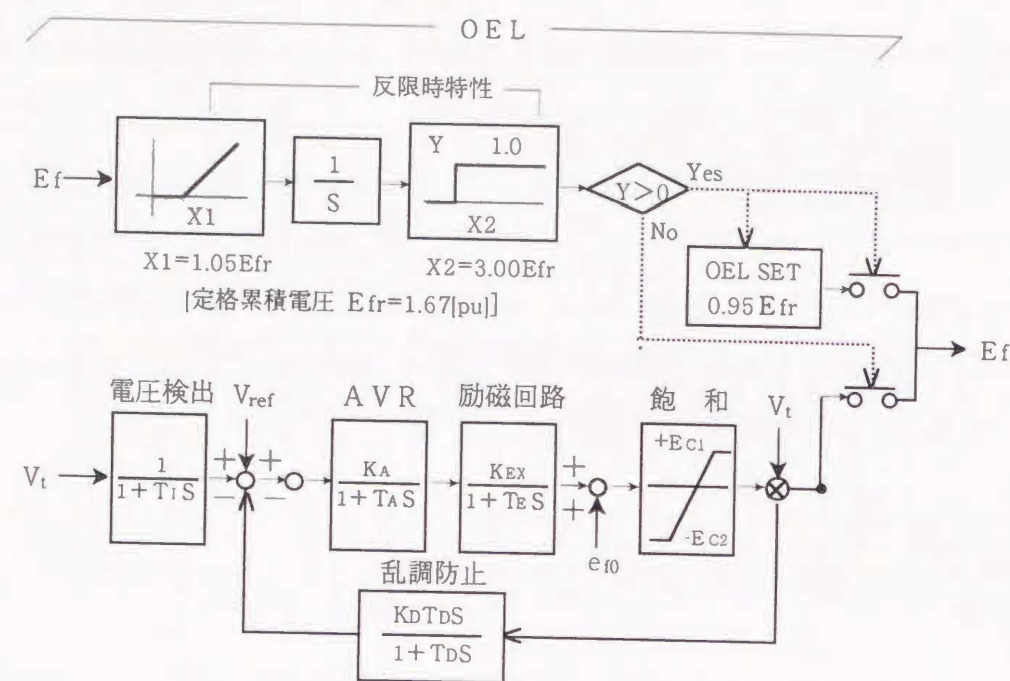

$$[T_1=0.022\text{sec}, K_A=200, T_A=0.01\text{sec}, K_{EX}=1.0, T_E=0.4\text{sec}, \\ E_{C1}=3.74\text{p.u.}, E_{C2}=3.14\text{p.u.}, K_D=0.066, T_D=0.22\text{sec}]$$

図4-16 励磁制御系ブロック図

#### 5.4.1 系統内発電機の電圧安定化効果

系統内発電機の電圧安定化効果について、5.3 項の送電限界電力0.69[pu]をベースとし検討する。なお、以下では特に断らない限り系統内発電機を、単に発電機と呼ぶこととする。

### (1) 検討条件

検討条件は、以下の通りである。

(a) 負荷と比較して小容量となるよう発電機の容量は、 $0.05[\text{pu}]$ と $0.1[\text{pu}]$ の2種類とする。

(b) 発電機端子電圧は、1.05[pu]とし、受電端目標電圧は、1.05[pu]または、1.0[pu]の2種類とする。このため、これまでと同様に調相容量を初期設定しておく。

## (2) 検討結果と考察

表4-7に検討結果を、また、図4-17と図4-18に受電端電圧など系統諸量の動揺波形例を示した。

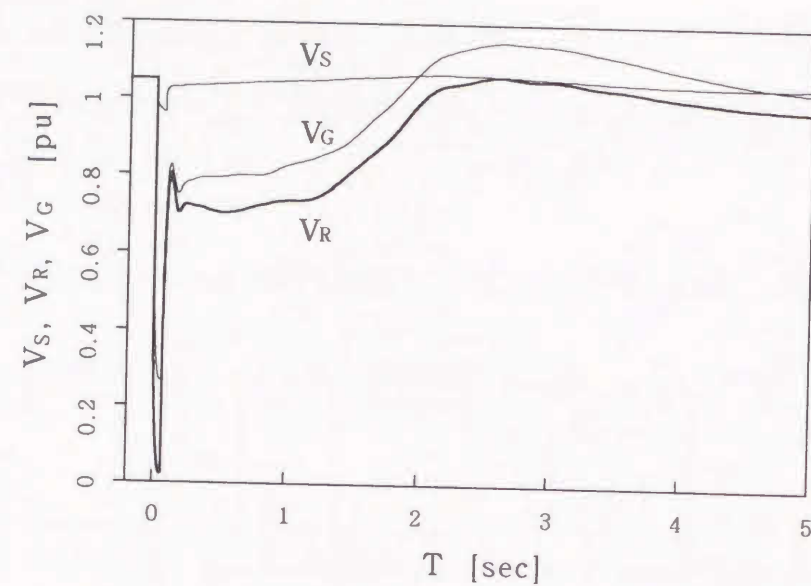
表4-7 発電機の電圧安定化効果 [単位: pu]

発電機容量	負荷有効電力	受電端電圧	調相容量	界磁電圧	界磁電流	発電機電流
0.5	0.79	1.052	0.28	1.326	1.326	0.857
		0.985		1.028	1.822*	1.047*
	0.74	1.001	0.16	1.922	1.922*	1.096*
		0.887		1.590	2.169*	1.360*
0.10	0.80	1.050	0.27	1.368	1.368	0.859
		0.988		1.909	1.533	0.902
	0.80	0.999	0.18	1.660	1.660	0.943
		0.893		2.165	1.934*	1.142*
	0.85	1.052	0.30	1.358	1.358	0.858
		0.965		1.965	1.534	0.920

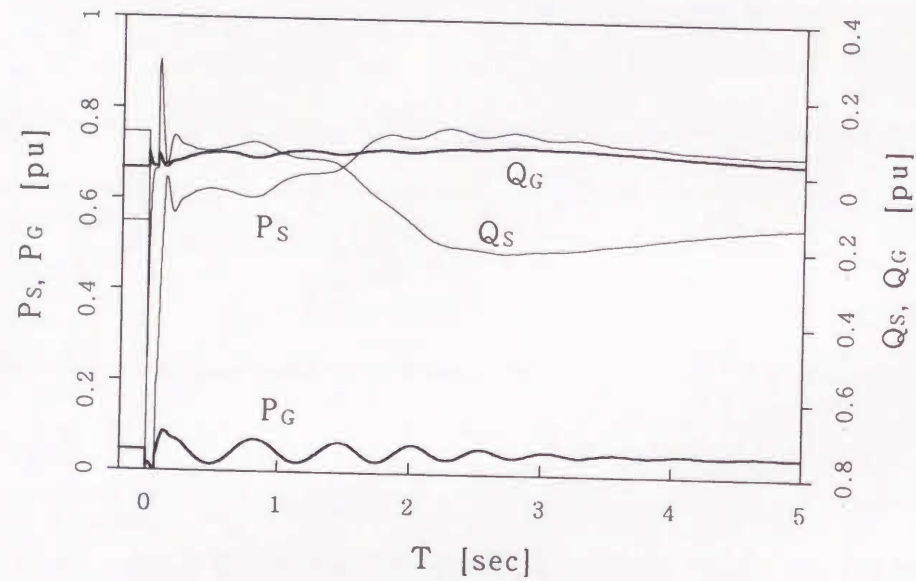
注1) 上段は初期設定時の値、下段は事故発生から5秒後の値である。

注2) \*は、定格界磁電流(1.67pu)、または、定格発電機電流(1.0pu)を超過していることを意味する。





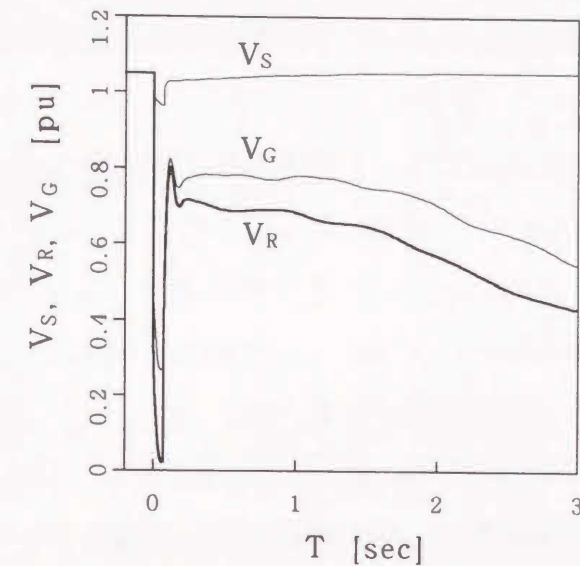
(a) 電源発電機電圧 $V_S$ , 受電端電圧 $V_R$ , 発電機電圧 $V_G$



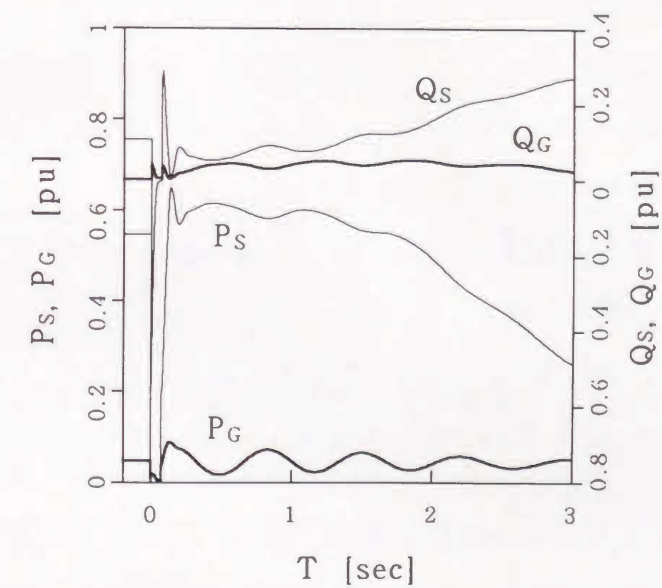
(b) 受電端の有効潮流 $P$ , 無効潮流 $Q$

[S: 電源系統から, G: 発電機から]

図4-17 系統諸量の動揺波形例 (電圧安定)



(a) 電源発電機電圧 $V_S$ , 受電端電圧 $V_R$ , 発電機電圧 $V_G$



(b) 受電端の有効潮流 $P$ , 無効潮流 $Q$

[S: 電源系統から, G: 発電機から]

図4-18 系統諸量の動揺波形例 (電圧崩壊)



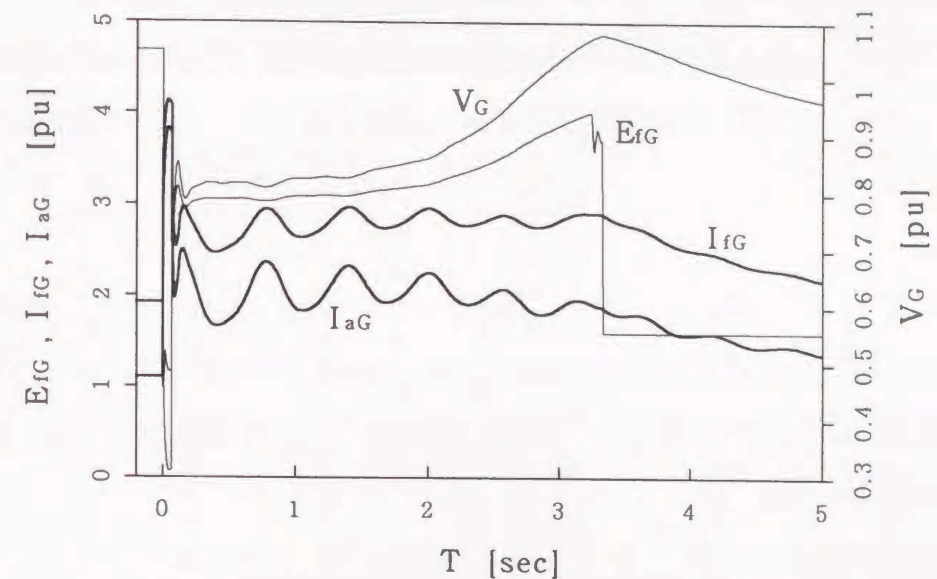
表4-7の結果をまとめると以下のようになる。

- (i) 発電機容量が0.05[pu]で、受電端の目標電圧が1.05[pu]とした場合の送電限界電力は、0.79[pu]であった。
- (ii) また、受電端の目標電圧を1.0[pu]に下げた場合の送電限界電力は、0.74[pu]であった。
- (iii) 発電機容量が大きい0.1[pu]では、受電端の目標電圧が1.05[pu]、1.0[pu]いずれの場合も負荷電力0.8[pu]で過渡電圧安定度が維持できている。また負荷電力0.85[pu]（受電端目標電圧1.05[pu]）でも電圧が安定化できている。
- (iv) 電圧安定化後（事故発生から5秒後）、発電機の界磁電流と発電機電流が定格を超過するケース（図中\*印）があった。
- (v) 特に、発電機容量0.05[pu]で、受電端の目標電圧を1.0[pu]の場合は初期状態で、負荷系統内発電機の界磁電流、発電機電流が定格値を超過している。また、このケースのみ、OEL（事故発生から3秒程度）が動作した。これを図4-19に示した。

すなわち、負荷系統内に発電機がある場合は電圧安定性が向上することが、今回の検討により明らかとなった。

また、電圧安定化に限界はあるものの発電機なしの場合（負荷0.69[pu]）と比較して、系統負荷が発電機出力（有効出力0.045[pu]）以上に増加（負荷0.8[pu]）しても過渡電圧安定性が維持できていることがわかった。

これは、事故除去直後に発電機の端子電圧、有効電力とも低下するもののAVR動作により界磁電圧が上昇し、図4-17（負荷0.79[pu]）からわかるように、発電機が無効電力を供給して電圧の安定化に寄与するためである。しかし、それにも限界があり、図4-18（負荷0.80[pu]）では、電圧安定化に必要な無効供給ができないため電圧が回復しないまま電圧崩壊に至っている。



[ $E_{fg}$ : 界磁電圧,  $I_{fg}$ : 界磁電流,  $I_{ag}$ : 発電機電流]

図4-19 OELの動作例

一方、事故発生から5秒後の時点で発電機の界磁電流、発電機電流が定格を超過するケースが現れている。表4-7で、発電機容量が同じものを見ると受電端の目標電圧が低い方の超過量が多くなっている。

これは、初期状態において、受電端の目標電圧と調相容量および発電機の端子電圧の関係により、系統内発電機から受電端に供給されている無効電力量が決まるが、その際、目標電圧が低いケースの方が多くの無効電力を供給する運転状態になっていたためである。例えば発電機容量0.05[pu]の場合、目標電圧1.0[pu]のとき0.031[pu]、目標電圧1.05[pu]の時には0.003[pu]であった。なお、発電機の運転状態からみると、発電機容量0.05[pu]で、受電端の目標電圧1.0[pu]のケースは通常運転されない厳しい状態である。また、過励磁制限OELが動作したのは、このケースのみである。



ことから、過渡領域でのOELの動作の可能性は少ないと考えられる。

発電機容量が大きい0.1[pu]では、同様の傾向にあるものの、定格の超過状況が緩和されていることがわかる。ここでは、過渡電圧安定性に注目していることから、詳細な議論はしないが定格超過については、平常時の調相設備容量や発電機の運転状態の検討、あるいは電圧安定化後の発電機の制御方法など何らかの対処が必要であろう。

以上、図4-1のモデル系統を対象としたシミュレーション検討により、負荷系統内に発電機があれば、過渡電圧安定性が向上することを明らかにした。また、電圧安定化後の発電機の運転状態が厳しくなる場合があること、過渡領域でのOEL動作の可能性が少ないことを示した。

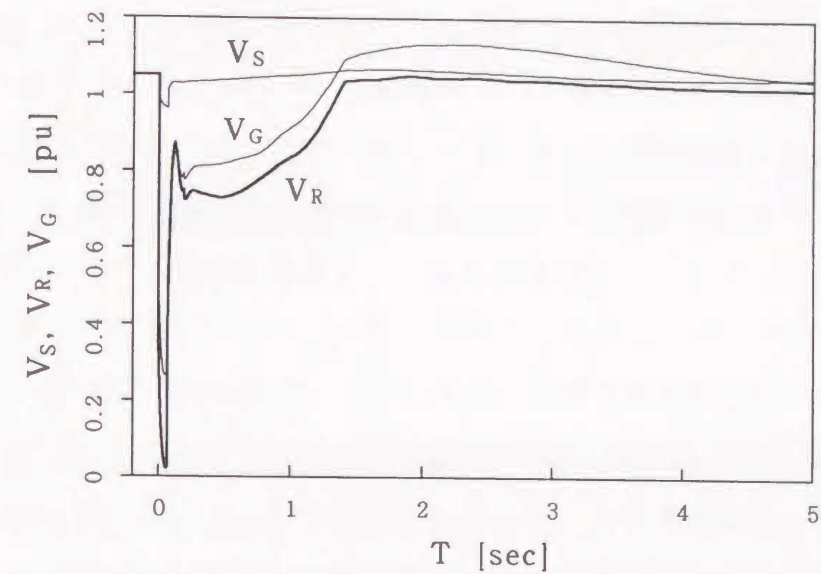
#### 5.4.2 負荷系統内発電機とATSCによる電圧安定化効果

前述の検討結果から、発電機容量が小さい0.05[pu]の場合の送電限界電力が、0.79[pu]であり、また、電圧安定化後の運転状態が厳しくなっていることがわかった。

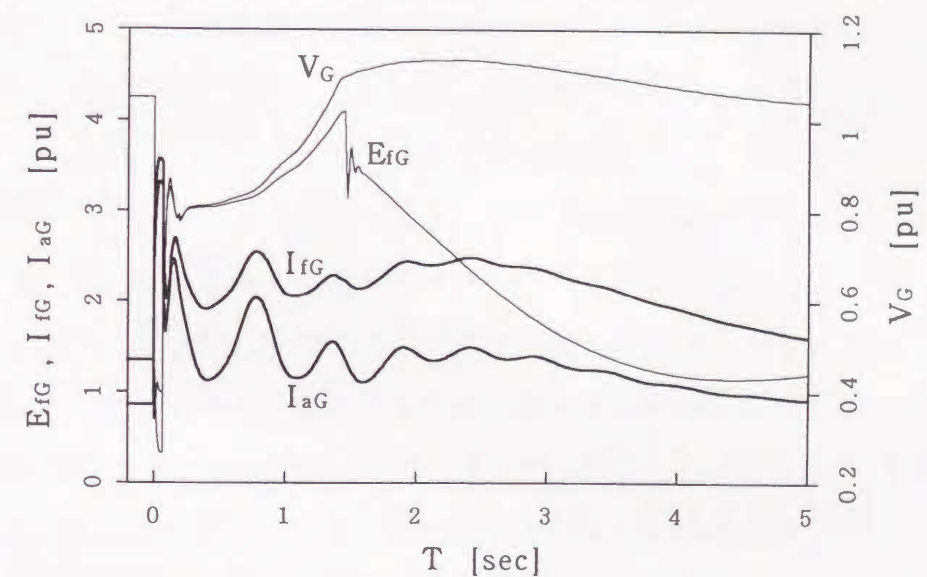
そこで、発電機に加え受電端にATSCを設置すれば、さらに過渡電圧安定性が向上し、発電機の運転状態も改善することができると考えられる。

ここでは、発電機の容量を0.05[pu]とし、発電機容量が0.1[pu]の場合に安定化することができた負荷電力0.85[pu]を対象として、過渡電圧を安定化するのに必要なATSC容量を求めることとする。検討条件は、これまでと同様とした。

検討の結果、ATSC容量0.08[pu]で過渡電圧を安定化できることがわかった。図4-18にシミュレーション時の動揺波形例を示す。



(a) 電源発電機電圧 $V_S$ 、受電端電圧 $V_R$ 、発電機電圧 $V_G$



(b) 発電機諸量 [ $E_{fG}$ :界磁電圧,  $I_{fG}$ :界磁電流,  $I_{aG}$ :発電機電流]

図4-18 系統内発電機とATSCによる電圧安定化



図から、系統事故後、受電端電圧が安定に回復されていることがよくわかる。

また、事故発生から5秒後における系統内発電機の界磁電流は1.52[pu]、発電機電流は0.94[pu]といずれも定格以下の値であり、このままの状態が運転が可能である。

このように、発電機にATSCを加えると、過渡電圧安定化効果が大きく、また、電圧安定化後の発電機の運転状態も改善される。従って、提案したATSCは、負荷系統内に発電機が存在しない場合だけでなく、負荷系統内の発電機の容量が負荷に対して非常に少ない場合にも有効な制御方式であることがわかる。

## 6. まとめ

本章では、最初に、系統の受電端における過渡電圧限界の基礎的な解析方法を示し、過渡電圧安定化の観点から、系統の電源電圧と受電端設備による安定化方法を検討した。その結果、受電端の目標電圧を高め設定し、まず、電源側電圧を高くした上で、変圧器のタップよりSCを優先して目標電圧を維持する方法をとれば設備が少なく電圧を安定化できることがわかった。また、系統運用面では、この方法を電圧安定化の予防制御に反映し、系統事故発生後に高速な安定化制御を行えば効果的に過渡電圧安定性を向上することができると考えられる。

さらに、電圧安定性の向上をはかるための制御方式として、過渡領域における安定化能力を向上させる新しい過渡電圧安定化制御方式(ATSC)を提案した。動シミュレーション検討の結果、本方式は瞬時的な過負荷・過電圧を伴うものの、従来のSVCと比較して、過渡領域の無効電力供給量が多く安定化効果が高いことから、SVCより設備が低減でき、高速な制御ができるなどその有効性が明らかとなった。

また、本章では、負荷系統内の発電機の電圧安定化効果や電圧安定後の運転状態などを明らかにするとともに、発電機にATSCを組み合わせると大きな電圧安定化効果が得られ、また、発電機の運転状態を楽な方向に改善できることが明らかとなった。

なお、本提案のATSCで変圧器タップの個数を増やしていけば、原理的には電圧の低下領域で無効電力一定に近い制御が可能となる。この為には、パワーエレクトロニクス応用機器のコスト低減が必要であり、今後、この分野での開発研究が期待される。

## 第5章 ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法

### 1. まえがき

電力系統の安定運用に不可欠な電圧安定性の監視等の点から、過渡的な電圧安定性の評価方法の開発が重要な課題になっている。

第2章で述べたように、従来の静的、準静的な電圧安定性評価手法は、過渡的な領域における発電機や励磁制御系さらに負荷の動特性が考慮されていないため、最近、電力系統で観測された過渡的な電圧崩壊現象を対象とする、いわゆる過渡電圧安定性に対して評価をすることが困難である。従って、過渡電圧安定性の評価方法としては、現在までのところ種々の条件ごとに動的シミュレーション解析し、その結果を評価する方法以外に有効な手法が見当らず、系統運用計画の効率化や系統のオンライン監視の観点から、容易に、また高速に過渡電圧安定性が評価できる手法の開発が強く求められている。

ところで、生体における脳の神経回路網を数学的にモデル化したニューラルネットワークは、情報の並列処理、学習機能、自己組織化能力など多くの優れた特徴を有している。学習にバックプロパゲーション法を適用した多層形ネットワークは、パターン認識を得意としており、非線形、不連続、不規則な現象に対して、学習によりそれらの事例を再現することができ、さらに、学習した後には予測も可能になることなどから、電力系統への応用研究が盛んに行なわれている。[30][31]

本章では、過渡電圧安定性の評価手法へのニューラルネットワークの適用について述べる。[33]

すなわち、2つの多層形ニューラルネットワーク(以下、NNと略記)を適用した過渡電圧安定性評価システムについて提案する。まず前段のNNは、過渡電圧安定性の観点から、与えられた運用条件や負荷の構成および事故点に対して系統が安定か、不安定かを判定する。もし、その結果が不安定であれば後段のNNが、電圧不安定性の過酷度の指標として緊急制御動作の臨界余裕時間を算定する。ここでは、電圧安定化の緊急制御として、定常状態では開放されている母線連系点を閉入する



制御を適用している。提案した過渡電圧安定性評価システムの有効性を検証するため、26母線のモデルシステムにおける数値計算例についても示している。[34][35]

## 2. 電圧崩壊緊急制御

### 2.1 モデル系統の基本特性

電力系統において、負荷母線電圧が系統の大外乱後、急速に電圧崩壊していく現象が観測されており[12]、いわゆる過渡電圧安定性問題が注目を集めている。

本章では、図5-1に示した一般的なモデル系統を用い、図中のループ系統における過渡電圧安定性を検討の対象とする。なお、ループ系統内には電力系統に存在する揚水機母線や夜間に消費電力が大きい負荷母線（自家発を有する工業負荷など）を考慮し、過渡電圧安定性問題をより多面的に検討できるようにしている。

さて、ループ構成で運用されている系統で送電線のルート事故が発生すると、最も過酷な場合ループが分断されて放射状系統による電力供給となる。このため、系統の末端となる負荷母線から系統側をながめると、系統インピーダンスが急増した状態に大きく変化するため条件によっては、末端付近の負荷母線において過渡電圧不安定化現象が発生することが考えられる。

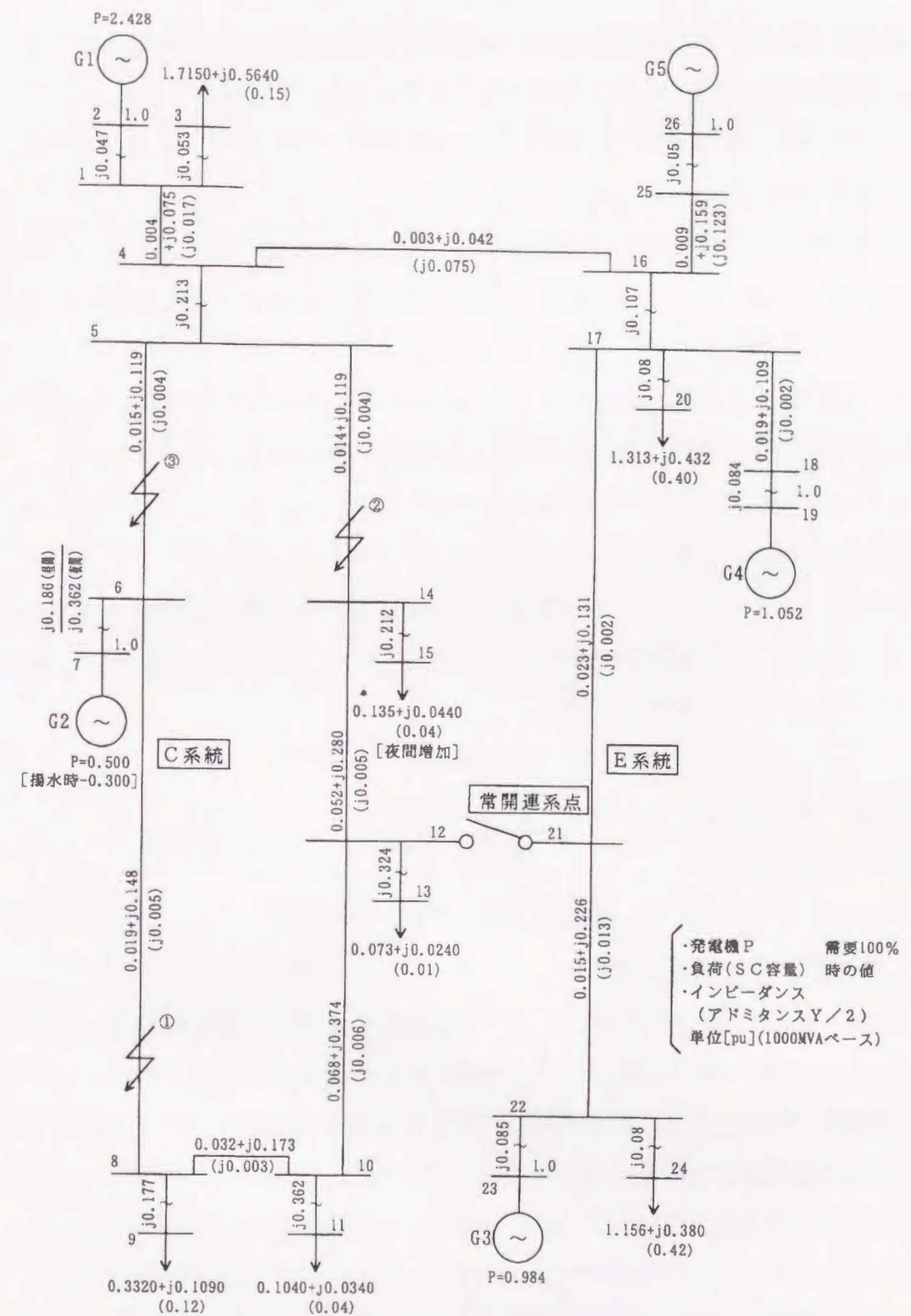


図5-1 モデル系統



過渡的な電圧崩壊現象の特徴は、進行速度の遅い不安定化現象と比較して、発電機、励磁制御系や負荷の動特性に大きく依存することにある。[12][15][35]

従って、過渡電圧安定性の解析にはこれらの動特性を考慮した動的シミュレーション手法が一般的に用いられる。

本章のモデル系統に対しても動的シミュレーション解析を行なうが、その検討条件や結果の詳細については後述することとし、ここでは過渡電圧安定性の観点から見たモデル系統の基本的な特性のみ抽出し、まとめておく。

(1) 昼間の重負荷時にはNo. 9 母線の負荷が大きく、①点で送電線のルート事故(2cct-3LGO)が発生するとNo. 9 付近の母線の電圧安定性が厳しい。

(2) 夜間では②点でルート事故が発生すると需要の大きいNo.15付近の母線の電圧安定性が厳しくなる。

(3) 同じく夜間に③でルート事故が発生すると、発電機G 2が揚水運転時にはNo. 7、No. 9 付近の母線の電圧安定性が厳しくなる。この時、揚水機の減速脱調いわゆる同期不安定現象も発生する。

## 2.2 電圧崩壊の緊急制御

電圧崩壊の緊急制御としては、図5-1のモデル系統において、常時は開放されているループ系統(C系統)と隣接系統(E系統)との連系点を系統事故発生後に閉入する制御を適用する。[36]

この制御により、常時分離されている両系統を連系し系統構成を高速に変更することで、電力輸送路のインピーダンスを低減させ送電限界容量を増加させて電圧の安定化をはかる。この緊急制御による過渡電圧安定化の概念を受電端におけるP-V軌跡を用いて図5-2に示した。すなわち、系統事故除去後に電圧不安定化現象が、軌跡C⇒D⇒Eのように進行するのに対し、本緊急制御を行うことによりP-V曲線が急速に膨らみ、図中の不安定平衡点より電圧が低く不安定な運用点Dが、不安定平衡点より電圧が高いF点へ瞬時に移動する。F点では、負荷要求よりも系統側の供給力が大きいことから、運用点はF点から、安定平衡点であるG点へ移動していき、電圧が安定化されるのである。

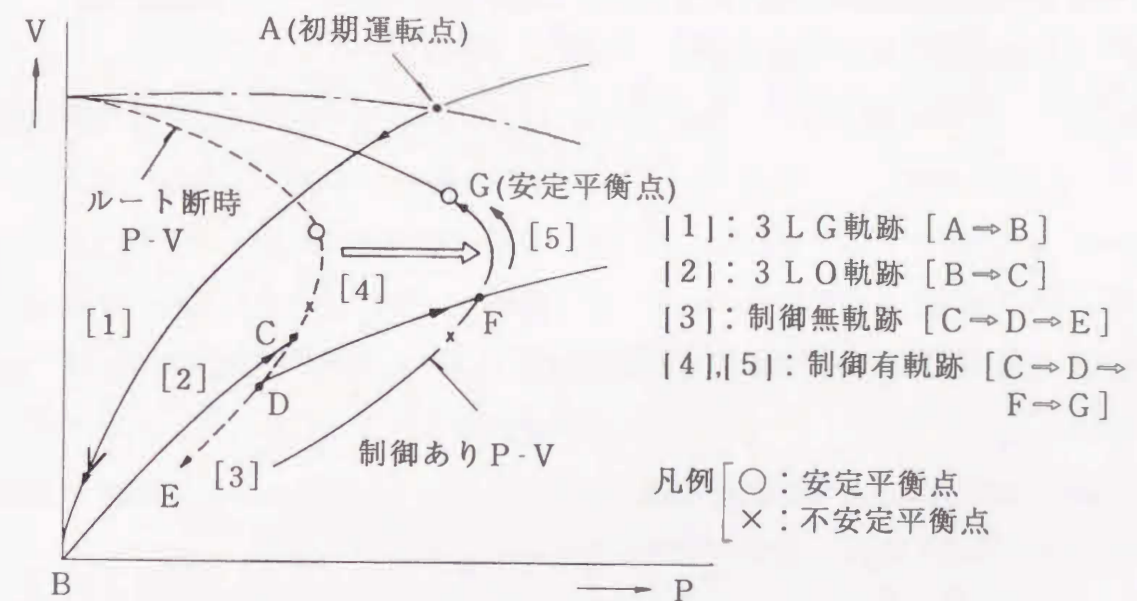


図5-2 本制御による電圧安定化の概念

本制御は、電力用コンデンサの高速投入など各負荷母線に注目した電圧安定化方策に対して、系統側からの電圧安定化という観点に立った安定化方策である。モデル系統では、①～③の事故に対して、各々異なった母線が電圧崩壊するという基本的特性があり、本制御によって、このような地点の異なる複数母線の安定化に1箇所の連系点の制御で対応することができる。本制御は、すべての系統に適用できるものではなく、適用可能な系統は限られる。しかしながら、そのような地点が存在すれば、本制御で複数母線の安定化がはかれることや、比較的経済的であるなど緊急制御として十分実用可能なものであり、効果の大きい有効な一方策と考えられる。[37] また、この場合、後述する過渡電圧安定性の評価指標として緊急制御の臨界余裕時間という1つのスカラー量を用いることが可能であり、過渡電圧安定性を評価することができる。



### 3. ニューラルネットによる過渡電圧安定性評価法

従来より、電圧安定性の評価指標が種々提案されているが、いずれも静的あるいは準動的なものであり、前述したような発電機や負荷の動特性の影響を受ける過渡電圧安定性の評価方法は、今のところシミュレーション解析を除いては見当らず、高速で正確な評価手法の開発が必要となってきた。

ところで脳の神経系をモデル化したニューラルネットワークには、学習機能を有し、システムの非線形性に対応できるという特徴がある。パターン認識に優れている多層形ネットワークは、非線形、不連続、不規則な現象に対して、学習によりこれらの事象を再現することができ、さらに、学習した後は予測も可能になる。

従って、過渡電圧安定性の評価に学習済みの多層形ネットワークを用いれば、系統諸量など入力種々が変化しても即時に評価結果が得られることから、入力種々が変化するたびに微分方程式を含む演算を繰り返し行う動的シミュレーション解析より高速に電圧安定性を評価することが期待できる。

そこで本節では、多層形ネットワークとこれを応用した過渡電圧安定性の評価法について述べる。

#### 3.1 多層形ネットワークと学習アルゴリズム

多層形ネットワークの概要を図5-3に示す。ここでは中間層を1層とし入力層、中間層、および出力層の3層で構成するネットワークとしている。

多層形ネットワークの学習方法には、バックプロパゲーション法[38]を適用することとし、その学習アルゴリズムの概要を以下に示す。

##### [学習アルゴリズム]

- 入力層に学習セットのあるパターン  $p$  の入力データを配置する。この時、教師信号として当該パターンの希望出力結果  $t_p$  を提示しておく。
- 中間層では、入力層の出力と入力層と中間層間の結合重み  $w$  から(5-1)式により中間層の入力  $net_p$  を計算し、これと特性関数から(5-2)式により中間層の出力を求める。ここで、特性関数としては(5-3)式のシグモイド関数を使用した。

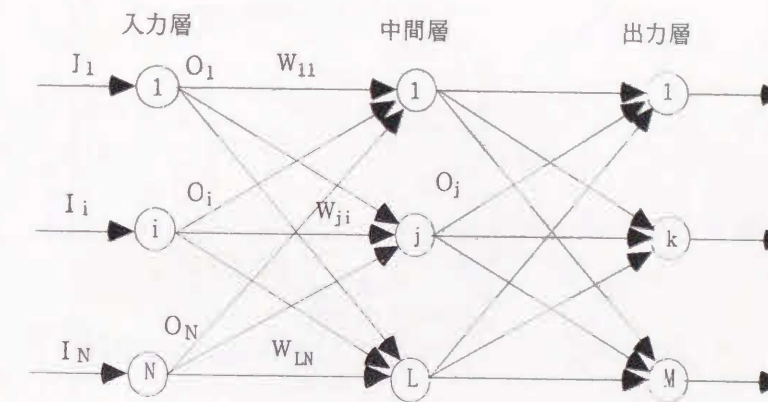
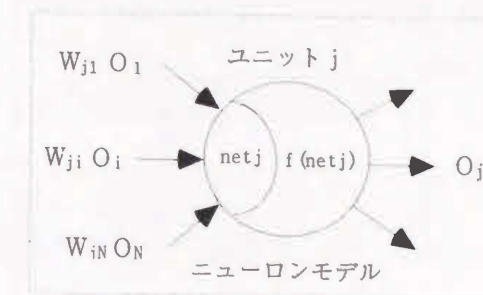


図5-3 多層形ネットワーク

$$net_{pj} = \sum_i w_{ji} O_{pi} \quad (5-1)$$

$$O_{pj} = f(net_{pj}) \quad (5-2)$$

$$f(x) = (1 + e^{-x})^{-1} \quad (5-3)$$

- (b)と同様にして、中間層と出力層の結合関係から出力層の入力を計算し特性関数から出力層の出力を求める。



(d) ネットワークの実際の出力 $O_{pj}$ と教師信号から $t_{pj}$ から次式で定義する2乗誤差 $E$ を計算する。

$$E = 1/2 \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (5-4)$$

(e) 2乗誤差 $E$ が減少するよう(5-5)式によりネットワークの結合の重み $w$ を修正する。

$$w_{ji} = w_{ji} - \eta \cdot \partial E / \partial w_{ji} \quad (5-5)$$

(f) 提示パターンを変更しながら2乗誤差 $E$ が十分小さくなるまで(a)~(e)を繰り返す。

### 3.2 多層形ネットワークによる過渡電圧安定性評価手法

過渡電圧安定性の評価法として、以下に示す多層形ネットワーク(以下NNと略記)を適用したシステムにより評価する方法を提案する。

NNによる過渡電圧安定性評価手法(以下、本手法と呼ぶ。)では、図5-4に示したように2つのNNを適用した評価システムにより過渡電圧安定性の評価を行う。まず前段のNN(以下、NN1)は、過渡電圧安定性の観点から、与えられた運用条件や負荷の構成および事故点に対して、系統が安定か、不安定かを判定する。もし、その結果が不安定であれば後段のNN(以下、NN2)が、電圧不安定性の過酷度の指標として緊急制御動作の臨界余裕時間を算定する。ここでは、電圧安定化の緊急制御として、2.2項で述べた定常状態では開放されている母線連系点を閉入する制御を適用している。

本手法を電圧安定性の監視に適用することを想定すると、評価指標は、系統運用者に理解しやすい指標であることが望まれる。この観点から、電圧安定化に必要な緊急制御の臨界余裕時間すなわち安定化制御の緊急度を評価指標とすることとした。

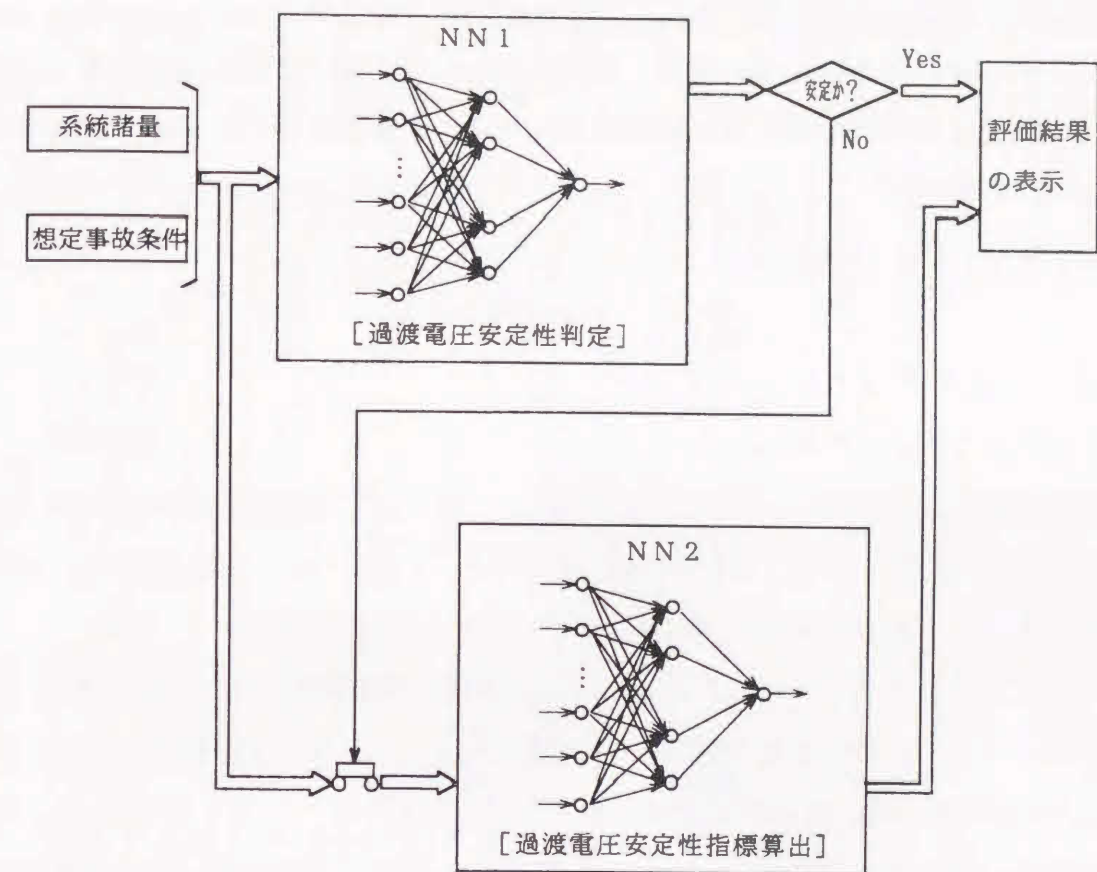


図5-4 NNによる過渡電圧安定性評価法の概要

従って、安定なケースでは、この評価指標は無限大となり意味を持たず、図5-4に示すようにNN1によって安定か不安定化を判定し、NN2によって評価指標を求める2段階の評価システムを必要とするのである。

以上、NNによる過渡電圧安定性評価手法について述べてきたが本手法の特長をまとめると次のようになる。

- (i) 入力情報は、系統諸量と想定事故条件のみで良い。
- (ii) 高速に過渡電圧安定性の判定ができる。
- (iii) 過渡電圧安定度の厳しさに関する情報を制御動作の緊急度という理解しやすい指標から得ることができる。



#### 4. モデル系統への適用

本節では、提案した過渡電圧安定性評価手法の有効性について図5-1に示した26母線のモデル系統を用いて検討する。系統運用条件（需要、発電機運転状態、系統構成）、負荷構成および事故点を種々組み合わせた条件下でNN1とNN2により電圧安定性の評価を行い、動的シミュレーション解析結果と比較検討することにより、本提案手法の有効性を示す。

##### 4.1 NNの構成と学習パターン

###### (1) NN1とNN2の構成

NN1は図5-5に示したように、入力層が48ユニット、中間層が15ユニット、出力層が1ユニットからなる3層で構成した。また、NN2は入力がNN1と同じであることから、NN1の構成と同じにしてある。ここで、入力ユニット数は、NN1、NN2の入力として図5-5中に示した発電機や負荷母線等の系統諸量および事故点を用いることから定めた。また、中間層のユニット数は試行錯誤的に定めた。

ここで、図5-5に用いた記号の意味は次の通りである。

V：発電機の端子電圧の絶対値,  $P_G$ ：発電機の有効電力,  $\delta$ ：発電機と負荷母線の電圧の位相角,  $P_L$ ：負荷の有効電力,  $Q_L$ ：負荷の無効電力,  $Q_C$ ：調相容量,  $I_C$ ：負荷構成(誘導機比率), SSC：系統構成(1ならば変更あり, 0ならば変更なし), FK：事故点①(1ならば事故あり, 0ならば事故なし), FM：事故点②(1ならば事故あり, 0ならば事故なし), FH：事故点③(1ならば事故あり, 0ならば事故なし)

なお、今回、入力として負荷母線の電圧の大きさは使用しなかった。これは、記憶容量や計算速度の面から、NNの入力数をできるだけ少なくすることが望ましいためである。この際、電圧の大きさではなく、他の諸量を除くことも考えられるが、一般に、潮流計算において負荷母線はPQ指定されることが多いことから、NNの入力として負荷母線の有効電力、無効電力および調相容量を選定した。また、母線電圧の位相角は、各母線間の相対的な関係を間接的にではあるが、NNに反映させられる入力と考えられることから、ループ系の連系変圧器1次側母線電圧の位相角 $\delta_5$ を基準として入力に用いている。

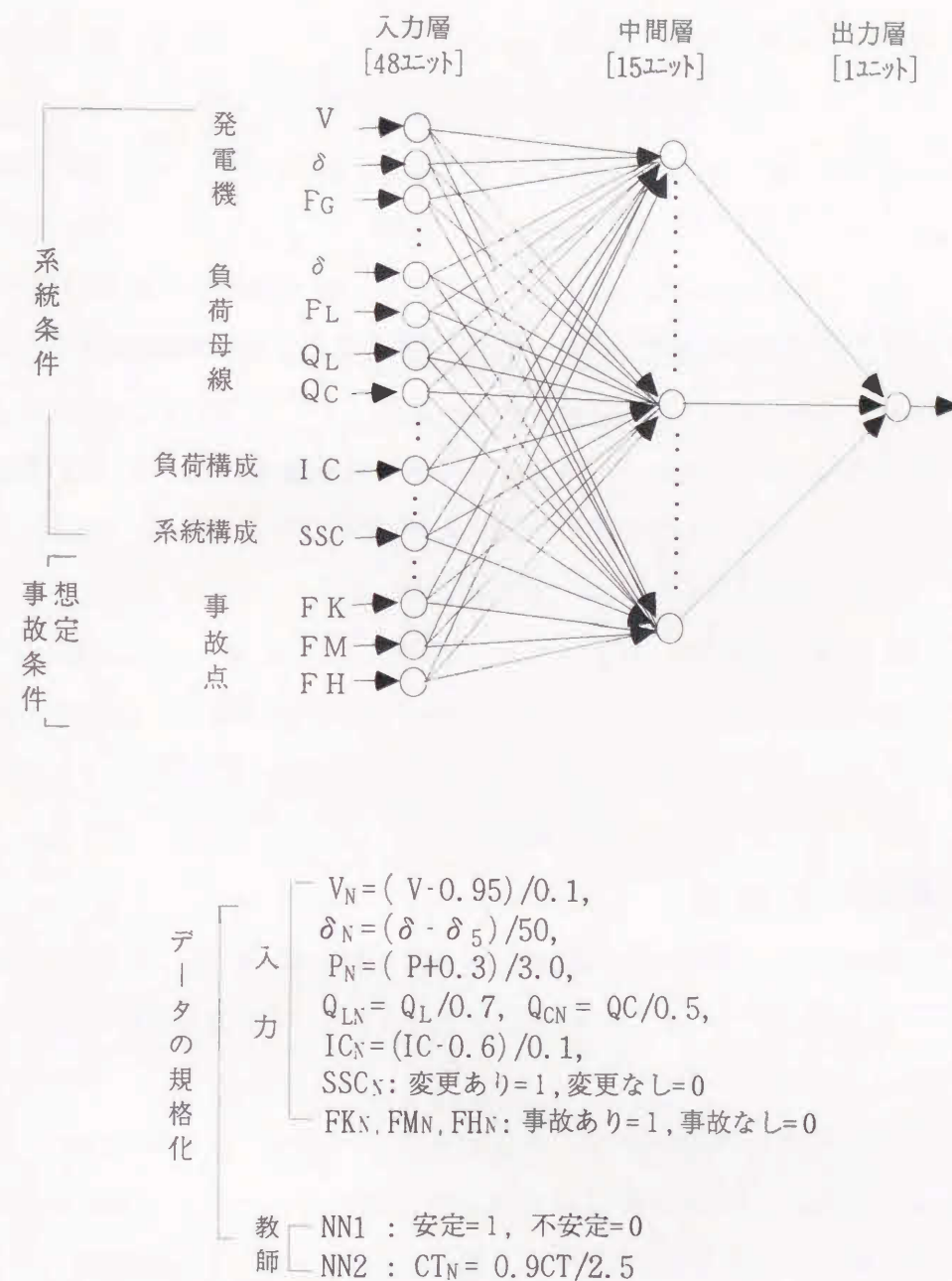


図5-5 NN1, NN2の構成



## (2) 学習用および未学習用パターンの作成

NN1とNN2の入力データと出力データからなる学習用パターンおよび未学習(検証用)パターンを作成する。ここで出力データには、動的シミュレーション解析の結果を用いる。NN1については安定か、不安定かを、また、NN2については不安定となったケースの緊急制御動作の臨界余裕時間(2.5秒以内とした。)を出力とする。

学習用および未学習用パターンは以下により作成する。

(i) 図5-1の需要を100%とし、昼間(110%~60%)、夜間(60%~40%)別の需要パターンと発電機の運転状態および系統構成変更の有無の系統運用条件から検討断面を作成する。

ここで、各負荷母線の電力は、需要100%における値を基準にして各需要の%値に比例させることとし、NNの非線形入力への対応能力をみるため、No.15母線には夜間に大口需要(特高の工業負荷など)を追加した。

発電機の運転状態としては、図5-1のG2の運転状態を発電、停止、揚水の3種類とし、また、発電機(G2, G3, G4)の端子電圧を2種類(1.01pu, 1.03pu)とした。但し、この3機の発電機の有効出力(G2は発電時のみ)は需要に合わせて調整することとし、G1の端子電圧、有効出力は一定としている。なお、G4はスウィング発電機としている。

系統構成の変更はNo.1母線からNo.4母線間の系統(縮約系統)における変更とした。これによりNo.1、No.4間の系統インピーダンスが系統変更ありの場合には、変更なしの場合の45%増となる。

(ii) (i)の各断面に負荷構成および事故点を組み合わせ、検討に使用する全パターンを作成する。ここで、系統負荷は誘導機負荷と定インピーダンス負荷の混合負荷とし、誘導機負荷(IM)の構成比率を2種類(60%と70%)とする。また、系統事故点は3種類(図5-1の①, ②, ③)とした。

以上により、NN1については、学習用192、未学習用132のパターンを作成した。未学習データは、学習データの需要に関する補間点としている。また、NN2については、学習用79、未学習用46(但し、学習用で内挿されるもの)パターンを

作成した。また、作成に当り図5-5に示したように入力データと出力教師データを正規化している。

ここで、図5-5の記号CTは、評価指標(出力教師データ)であり、また、データの正規化でNNの入出力値となる左辺には、添字Nを付けた。

## 4.2 動的シミュレーション解析

系統事故発生後の過渡的な時間領域における電圧安定性は発電機や負荷の動特性の影響を大きく受けるため、その解析には動的シミュレーション手法が適用される。ここでは、第4章の5.1項で述べた解析手法を用いることとする。

すなわち、発電機モデルはParkの同期機D-Q座標系モデルを基本とし、これを一部修正拡張したものを用いる。発電機および励磁制御系は一般的なものをを用いた。励磁制御系のブロック図の例を図5-6に示した。

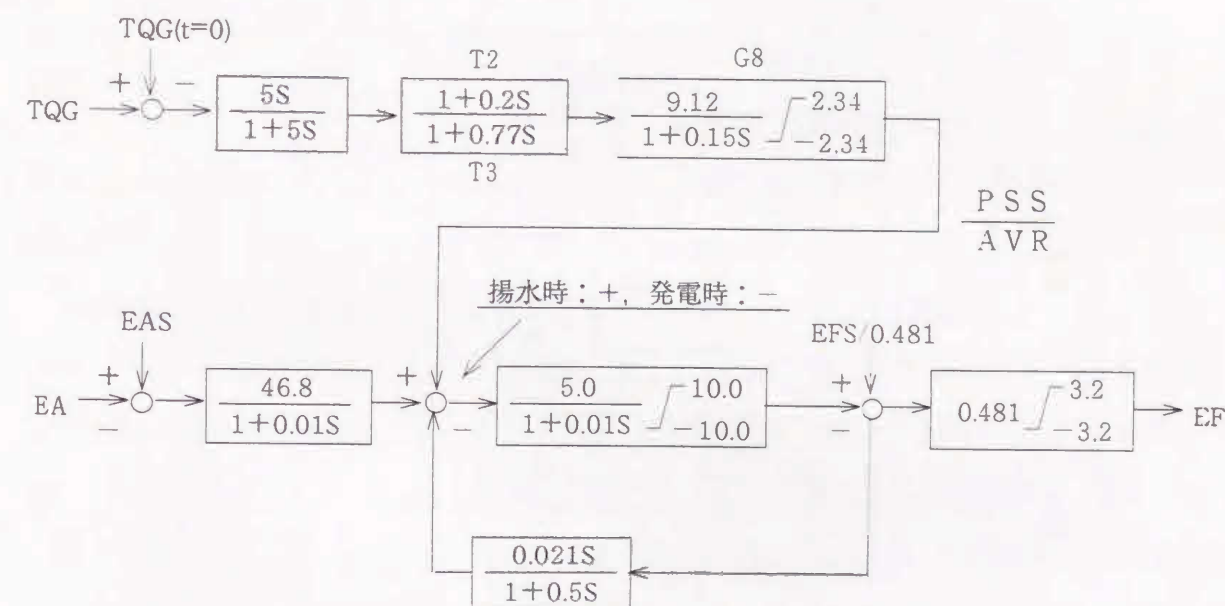


図5-6 励磁制御ブロック図



また、系統負荷モデルとしては、前述したように負荷の動特性を考慮するという観点から誘導機負荷モデルを導入し、これと定インピーダンス特性負荷の混合負荷モデルとしている。表5-1に誘導機の定数を示した。

表5-1 誘導機の定数

項 目	自己容量ベース [PU, S]
一次巻線抵抗 $R_1$ (二次 $\propto R_2$ )	0.05 [PU]
一次巻線漏リアクタンス $X_1$ (二次 $\propto X_2$ )	0.10 [PU]
励磁リアクタンス $X_m$	1.9 [PU]
慣性定数 $M$	1.0 [S]

なお、シミュレーション解析時の条件として、事故条件は最も過酷な送電線のルー  
ト事故 (2cct-3LGO)、事故継続時間は0.07秒としている。

### 4.3 提案システムの評価

#### (1) NN1の学習と電圧安定性判定

系統運用条件、負荷構成および事故点を組み合わせて学習用に作成した192パター  
ンをバックプロパゲーション法により、NN1に学習させた。学習では、学習係数  
 $\eta$ を2.0とし、2000回 (192パターンの学習を1回とする。) 行わせた。学習終了  
時の2乗誤差の平均値は、4.8470E-6であった。

NN1の検証を行うため、学習済NN1を用いて、132の未学習パターンについ  
て、安定 [NN1出力: 0.0~0.2]、不安定 [NN1出力: 0.8~1.0] として、電  
圧安定性の判定を行わせた。NN1の判定結果の例をシミュレーション解析結果と  
比較して表5-2(a)と表5-2(b)に示した。その結果、1パターンについて判定を誤った  
ものの、正解率99%という良好な結果が得られた。

また、表5-2(b)に示したように系統変更ありの場合でも正確に電圧安定性の判定  
ができている。

表5-2 NN1による電圧安定性判定結果

(a) 系統変更なし [○: 安定, ×: 不安定]

系統条件					想定事故 条件	電圧安定性 判定結果	
負荷状態			発電機運転状態			故障点	NN 1
昼夜別	需要(%)	負荷構成 IM比率(%)	揚水機運転 (出力[MW])	端子電圧 [pu]			
昼間	105	60	発電( 550)	1.01	①	×	×
昼間	105	70	発電( 550)	1.01	②	○	○
昼間	95	60	発電( 430)	1.03	①	×	×
昼間	95	70	発電( 430)	1.01	③	○	○
昼間	95	60	発電( 430)	1.03	②	○	○
昼間	85	70	発電( 280)	1.01	①	×	×
昼間	75	60	発電( 150)	1.01	③	○	○
昼間	65	70	発電( 50)	1.01	②	○	○
夜間	55	60	停止	1.01	②	×	×
夜間	55	70	停止	1.01	①	×	×
夜間	55	60	揚水( -300)	1.01	①	○	○
夜間	45	60	停止	1.03	③	×	×
夜間	45	70	揚水( -300)	1.01	②	×	×
夜間	45	70	揚水( 300)	1.03	①	○	○

(b) 系統変更あり [○: 安定, ×: 不安定]

系統条件					想定事故 条件	電圧安定性 判定結果	
昼夜別	負荷状態 需要(%)	負荷構成 IM比率(%)	発電機運転状態 揚水機運転 (出力[MW])	端子電圧 [pu]		NN1	シミュレーション
昼間	105	60	発電( 550)	1.01	②	○	○
昼間	105	70	発電( 550)	1.01	①	×	×
昼間	95	60	発電( 430)	1.01	③	○	○
昼間	95	60	発電( 430)	1.03	②	○	○
昼間	95	70	発電( 430)	1.03	①	×	×
昼間	85	70	発電( 280)	1.01	①	×	×
昼間	75	60	発電( 150)	1.01	③	○	○
昼間	65	70	発電( 50)	1.01	②	○	○
夜間	55	70	停止	1.01	①	×	×
夜間	55	70	停止	1.01	②	×	×
夜間	55	60	揚水( -300)	1.01	②	×	×
夜間	45	60	停止	1.01	③	○	○
夜間	45	60	揚水( 300)	1.03	③	×	×
夜間	45	70	揚水( -300)	1.03	①	○	○



## (2) NN2の学習と電圧安定性評価指標

NN2では電圧不安定現象が発生する79パターンについて、学習係数 $\eta$ を1.5として2000回学習させた。学習終了時の2乗誤差の平均値は、3.5664E-5であった。

未学習46パターンの過渡電圧安定性の評価指標（緊急制御の臨界余裕時間）を出力させ、その結果の例を表5-3(a)と表5-3(b)に示した。ここでの出力例は秒に換算後の数値である。シミュレーション結果と比較して誤差の平均値は0.029秒で、最大誤差でも0.096秒であり、かなり精度の高い結果を得ることができた。

また、図5-7はNN2の入力である需要と揚水機の出力をそれぞれX軸、Y軸にとり、NN2の出力である評価指標をZ軸として、3次元空間上にNN2の入出力関係を表示したものである。

昼間の重負荷時に電圧安定性の厳しい事故点①については、NN2の入力である需要ならびに揚水機出力とNN2の出力である評価指標との関係が非線形であり、特に需要と指標との非線形性の強いことが図5-7(a)からよくわかる。(b)は(a)より負荷構成でIMの比率が高いため相対的に曲面の位置が(a)より下がっており形状はほぼ相似している。また、夜間に電圧安定性が厳しい事故点②に関する図5-7(c)、(d)を見ると、NN2の入出力関係は(a)、(b)より変化は少ないもののやはり非線形であることがわかる。すなわち、NN2は入力と出力間の非線形な特性を学習機能により獲得し、パターンの違いを識別する認識力をネットワークの内部構造に実現していることがわかる。このような機能、特性はNN特有のものであり、また、前述の良好な計算結果からみても、NNの過渡電圧安定性評価への適用の有効性は明らかである。

表5-3 NN2による電圧安定性評価指数

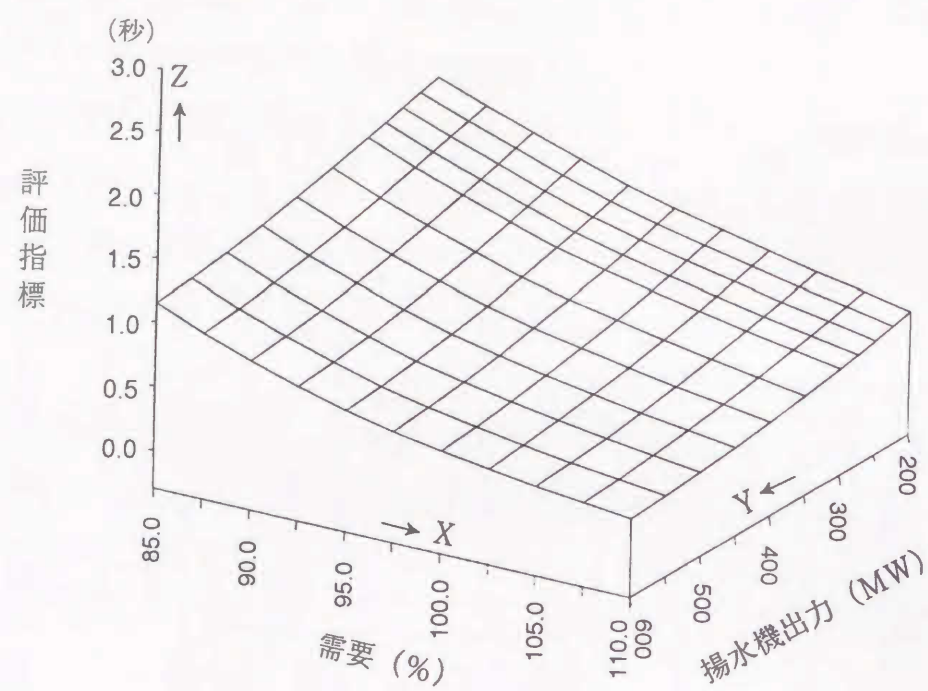
### (a) 系統変更なし

系統条件					想定事故 条件 故障点	評価指数(秒)	
昼夜別	負荷状態 需要(%)	負荷構成 IM比率(%)	発電機運転状態 揚水機運転 (出力[MW])	端子電圧 [pu]		NN2	シミュレーション
昼間	105	60	発電( 550)	1.01	①	0.417	0.430
昼間	105	70	発電( 550)	1.01	①	0.245	0.240
昼間	95	60	発電( 430)	1.03	①	0.970	0.970
昼間	95	70	発電( 430)	1.01	①	0.425	0.480
昼間	95	70	発電( 430)	1.03	①	0.510	0.570
昼間	85	70	発電( 280)	1.01	①	0.897	0.870
夜間	55	70	停止	1.01	②	0.693	0.690
夜間	55	60	揚水( 300)	1.01	③	0.212	0.240
夜間	45	70	停止	1.01	②	0.738	0.760
夜間	45	60	揚水( 300)	1.03	②	1.274	1.200
夜間	45	70	揚水( 300)	1.01	②	0.805	0.790
夜間	45	70	揚水( 300)	1.03	③	0.265	0.290

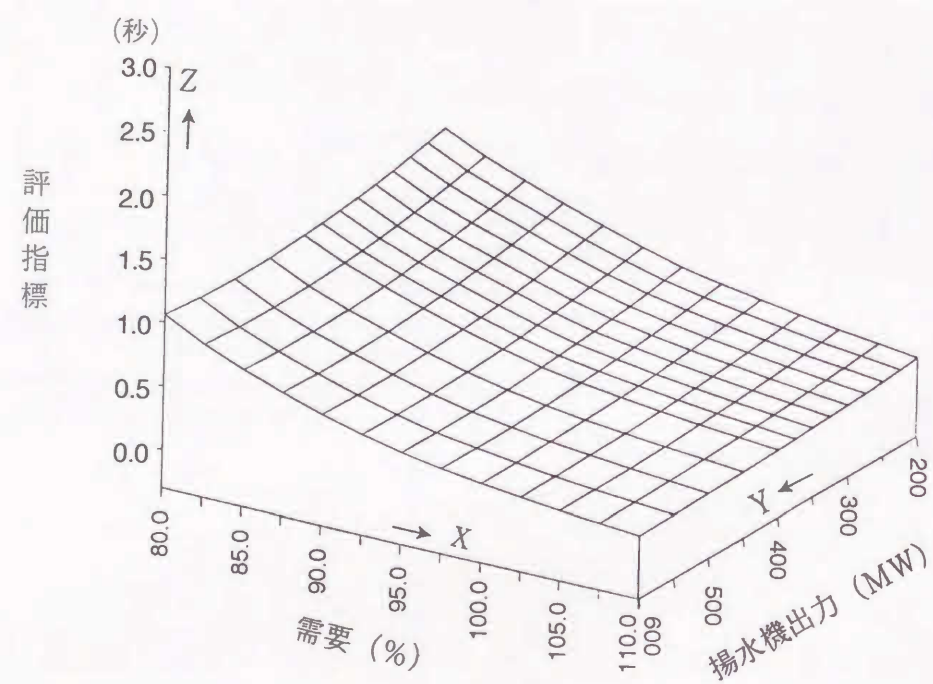
### (b) 系統変更あり

系統条件					想定事故 条件 故障点	評価指数(秒)	
昼夜別	負荷状態 需要(%)	負荷構成 IM比率(%)	発電機運転状態 揚水機運転 (出力[MW])	端子電圧 [pu]		NN2	シミュレーション
昼間	105	60	発電( 550)	1.01	①	0.396	0.410
昼間	105	70	発電( 550)	1.01	①	0.244	0.230
昼間	95	60	発電( 430)	1.01	①	0.721	0.750
昼間	95	60	発電( 430)	1.03	①	0.922	0.930
昼間	95	70	発電( 430)	1.01	①	0.414	0.460
昼間	85	70	発電( 280)	1.01	①	0.829	0.830
夜間	55	70	停止	1.01	②	0.636	0.650
夜間	55	70	揚水( 300)	1.01	②	0.630	0.680
夜間	45	70	停止	1.01	②	0.684	0.700
夜間	45	60	揚水( 300)	1.01	③	0.270	0.260
夜間	45	70	揚水( 300)	1.03	②	0.885	0.820
夜間	45	70	揚水( 300)	1.03	③	0.246	0.260

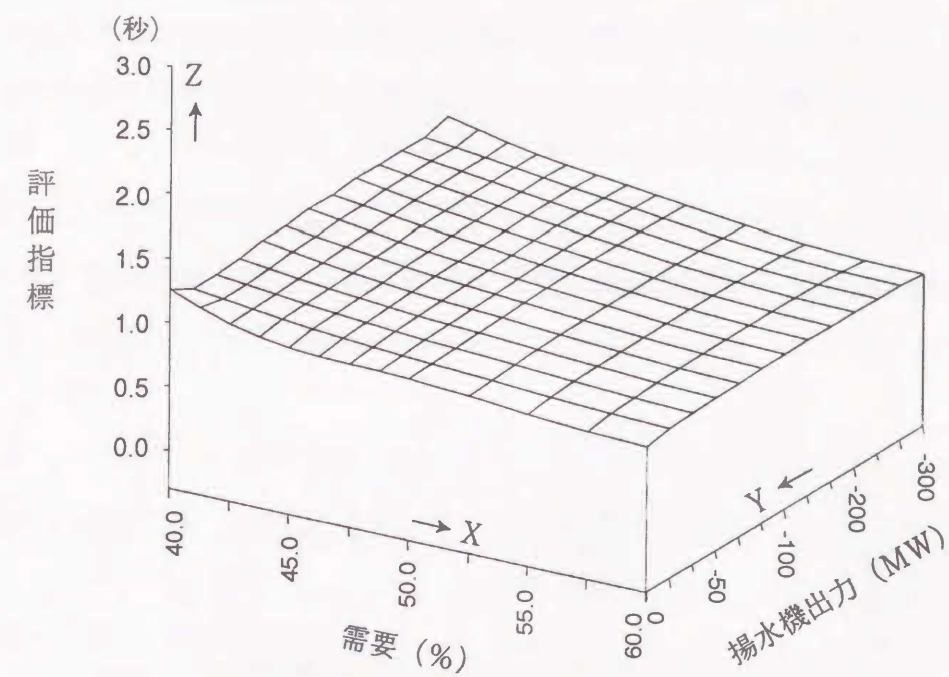




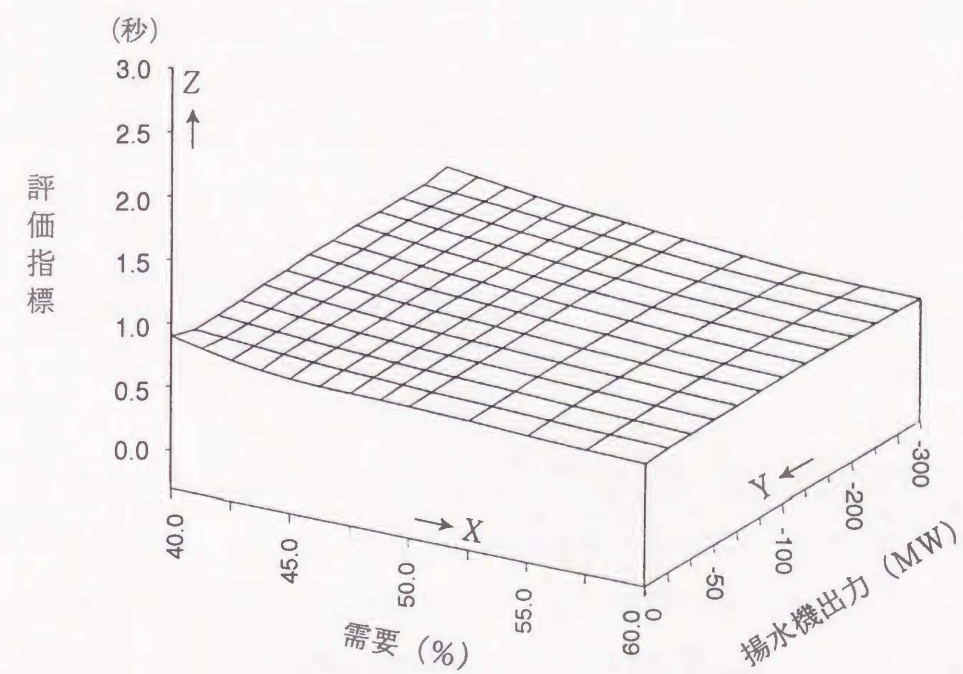
(a)



(b)



(c)



(d)

図5-7 NN2の入出力関係



なお、今回のNN2の学習においては、教師データである緊急制御の臨界余裕時間が、その上限（2.5秒）付近となるような学習パターンがなかった。図5-7(a)のある断面での需要と評価指標との関係を示した図5-8（図中に切断面の概要を示した。）では、需要90%時の臨界余裕時間が学習された中で最大である。

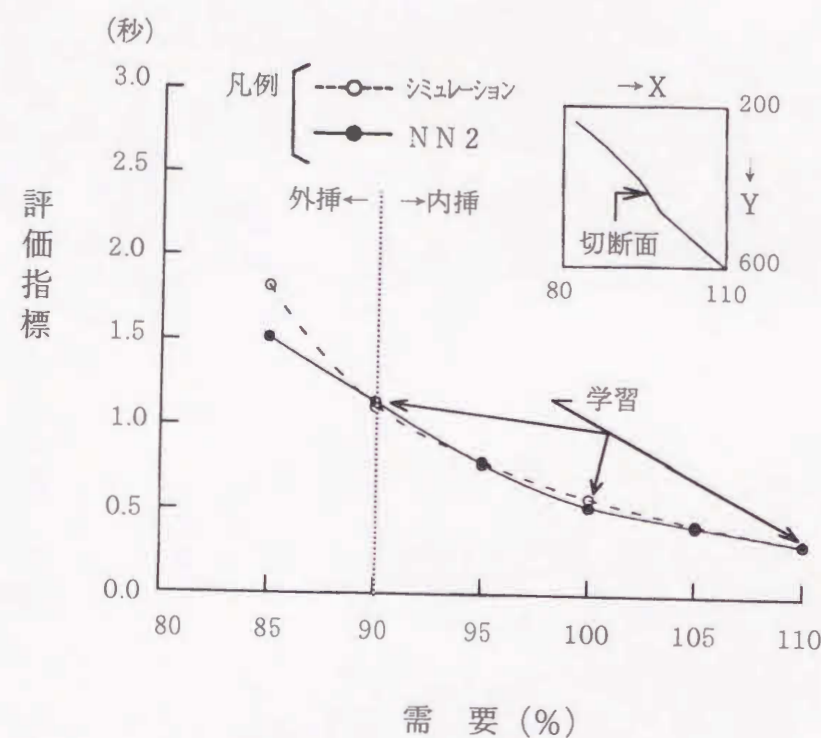


図5-8 需要と評価指標の関係

同図から、需要がこれ以上の値で、NN2の学習で内挿されている需要パターンについては誤差が非常に小さいが、需要が90%未満で外挿にあたる需要パターンでは誤差が大きくなる傾向が見られる。従って、実用化などに際しては、未学習パターンが内挿されるように、緊急制御の臨界余裕時間が上限付近となるようなパターンを学習させておくことも必要と思われる。

## 5. まとめ

本章では、過渡電圧安定性の評価法の開発に関する基礎検討として、2つの多層形ニューラルネット（NNs）を適用したシステムによる高速で、正確な評価方法を提案した。

提案手法では過渡電圧安定性の判定を前段のNNで行い、後段のNNにより過渡電圧不安定性の評価指標として緊急制御の臨界制御余裕時間を用いて評価を行うものである。26母線のモデル系統における数値計算例を示し、本提案手法の有性が明らかとなった。

すなわち、時間と労力を要する動的シミュレーション方法以外に、初めて過渡電圧安定性を評価できる方法が開発でき、しかも基礎的段階ではあるものの過渡電圧安定性を高速に、かつ精度よく評価できることが本研究により明らかとなった。



## 第6章 結 言

以上本研究では、電力系統の安定性の向上・安定運用という観点から、過渡電圧安定性の問題を対象として、電圧の安定化制御方式や安定性評価法などについての基礎的研究を行い次のような成果が得られた。

最初に電力系統の安定性問題について概説し、電圧安定性問題の特徴を明らかにした。そのうえで、電圧安定性問題を分類し、本研究の主課題である過渡電圧安定性問題の位置づけと研究課題を明確にした。

本研究では、電圧安定性を動的な観点からとらえた基礎実験を行い、系統の不平衡状態や送電線の再閉路等、種々の系統条件と負荷特性が電圧安定性に与える影響が明らかとなった。また、系統状態と安定送電限界の検討や負荷特性と電圧不安定現象の進行速度との関係ならびに故障送電線再閉路時の現象の考察から、今後の過渡的な電圧安定性問題の研究に有用な新しい知見が得られた。

次に、系統の電圧安定性向上の観点から、系統の受電端における過渡電圧限界の解析を行い、系統計画・運用に有用な電源電圧と受電端設備の制御方法を明らかにした。さらに、パワーエレクトロニクス技術の応用により過渡領域における電圧安定化能力を向上できる電圧安定化制御方式を提案しその有効性を明らかにした。

また、系統運用計画の効率化や系統のオンライン監視への応用の観点から、高速な過渡電圧安定性評価法として、緊急制御の臨界余裕時間を評価指標とするニューラルネットワークを適用した評価法を提案し、モデル系統におけるシミュレーション検討からその有効性が明らかとなった。

今後も電力需要の緊張な増加が予想されており、電力設備の立地難や地球環境問題などの制約の中で、電力系統はさらに大規模化、複雑化していくと思われる。

従って、将来の電力系統に対しては、既設電力設備の有効活用の観点からも、パワーエレクトロニクスやニューラルネットワーク等々新技術を積極的に活用する系統安定化技術の研究開発が進められ、経済的な設備形成や系統の安定運用がはから



れると考えられる。

本研究の成果が、今後の電力システムの安定性問題に関する技術や研究開発に少しでも役立てば幸いである。

## 添 付 資 料



## 添付資料目次

[A] 第3章関連	付-1
本文 (3-3) 式の導出	付-1
[B] 第4章関連	付-2
付図4-1 電圧安定化方法のシミュレーション結果1	付-2, 3
付図4-2 電圧安定化方法のシミュレーション結果2	付-4, 5
付図4-3 SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果1	付-6, 7
付図4-4 SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果2	付-8, 9
付図4-5 ATSCによる電圧安定化のシミュレーション結果	付-10, 11
付図4-6 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果1	付-12～14
付図4-7 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果2	付-15～17
付図4-8 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果3	付-18～20
付図4-9 発電機とATSCの電圧安定化効果のシミュレーション結果	付-21～23



### 第3章関連

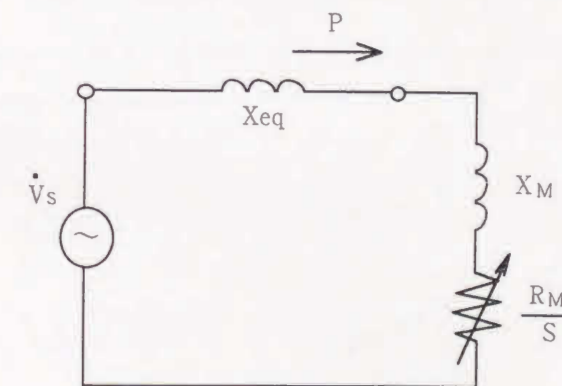
#### 本文(3-3)式の導出

本文の条件より図2の等価回路は、 $X_{eq}$ を導入すると付図3-1のように簡略化した等価回路で表わすことができる。同図より送電電力 $P$ は、次式で求められる。

$$P = \frac{R_M / S}{(R_M / S) + (X_{eq} + X_M)} V_s^2 \quad (\text{付3-1})$$

ここで、電源電圧 $V_s$ 一定のもとで、 $I_M$ のすべり $S$ の範囲を、 $1 > S > 0$ とし、 $P$ が最大値となる送電限界電力 $P_m$ を求めると次式を得る。

$$P_m = \frac{V_s^2}{2(X_{eq} + X_M)} \quad (\text{付3-2})$$



付図3-1 等価回路

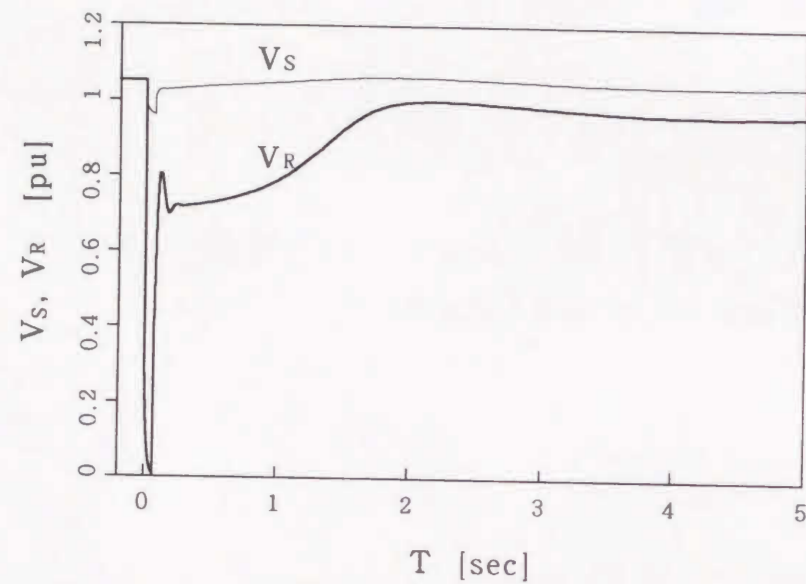


第4章 関連

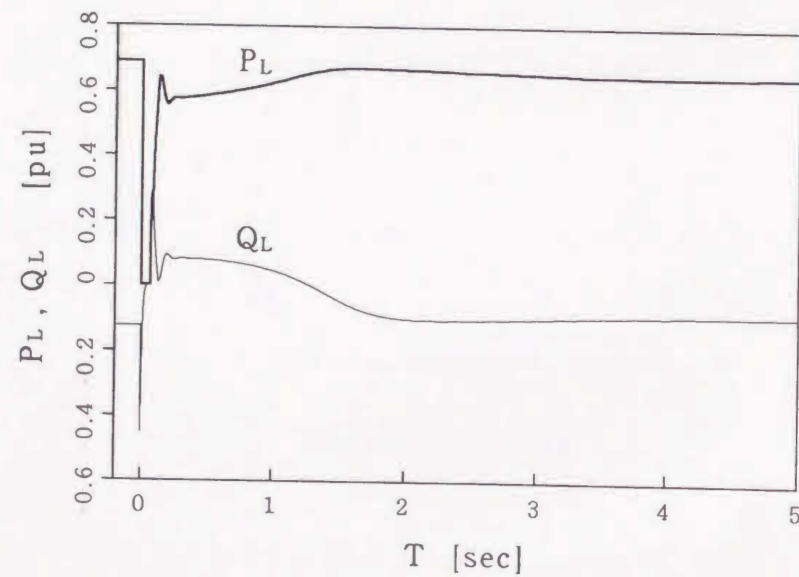
付図4-1

電圧安定化方法の動的シミュレーション結果1

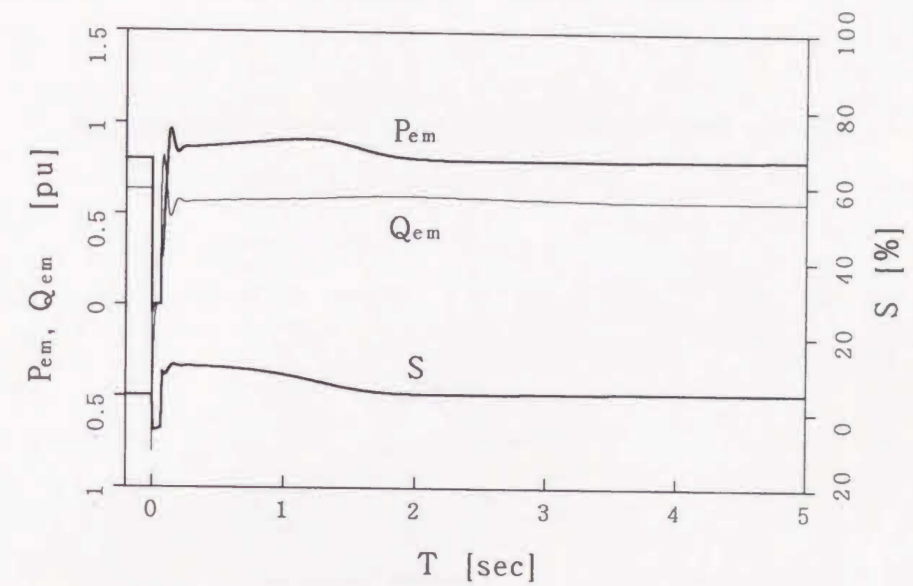
条件：負荷  $P_L=0.69$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.0$  [pu]，SC容量  $Y_{co}=0.18$  [pu]



(a) 電源発電機電圧  $V_S$ 、受電端電圧  $V_R$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ 、負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)



(c) IM有効電力  $P_{em}$ 、無効電力  $Q_{em}$ 、すべり  $S$

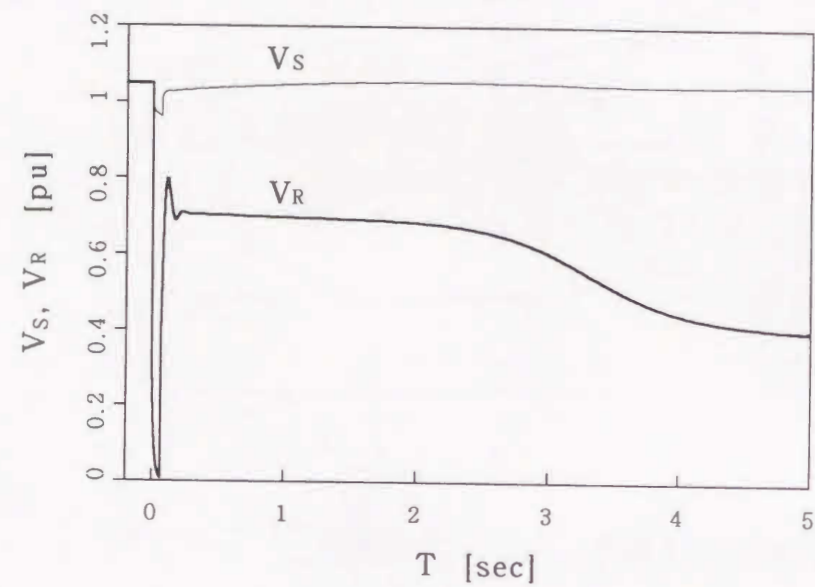
付図4-1 電圧安定化方法のシミュレーション結果1



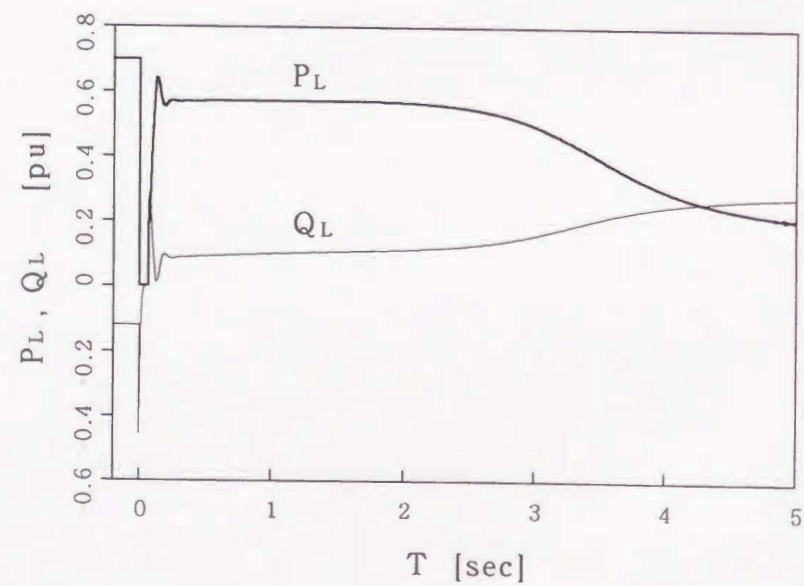
付図4-2

電圧安定化方法の動的シミュレーション結果2

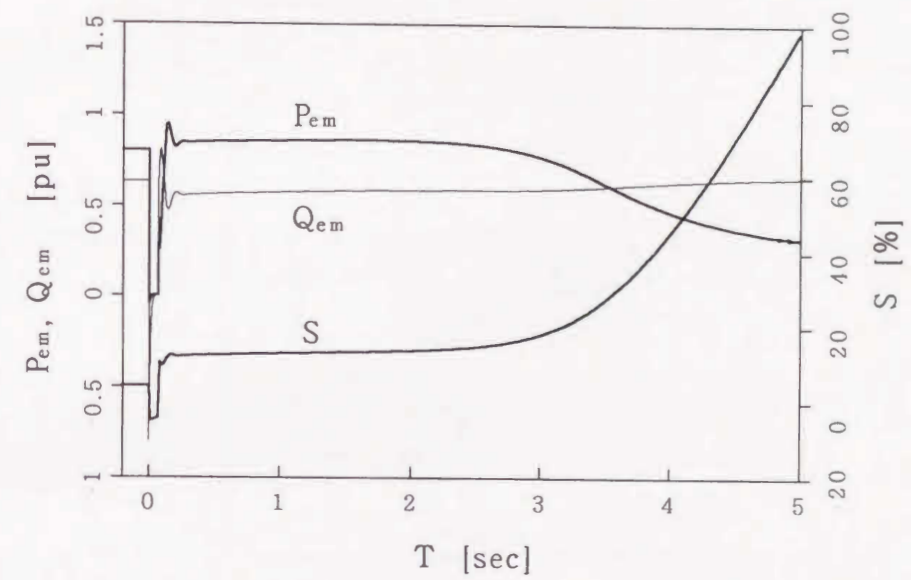
条件：負荷  $P_L=0.70$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.02$  [pu]，SC容量  $Y_{co}=0.18$  [pu]



(a) 電源発電機電圧  $V_S$ ，受電端電圧  $V_R$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ ，負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)



(c) IM有効電力  $P_{em}$ ，無効電力  $Q_{em}$ ，すべり  $S$

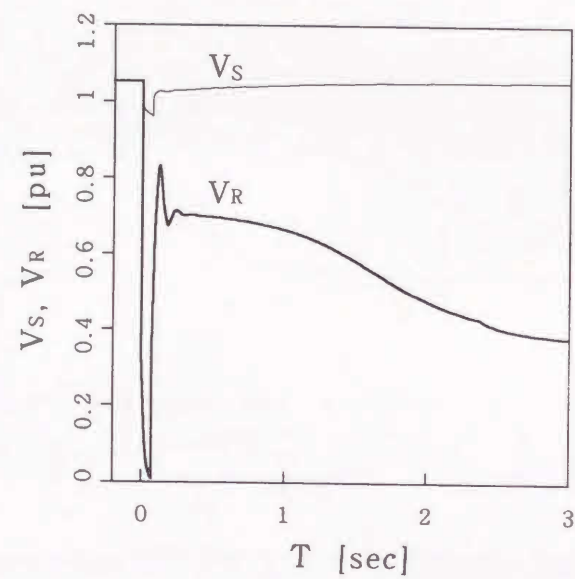
付図4-2 電圧安定化方法の動的シミュレーション結果2



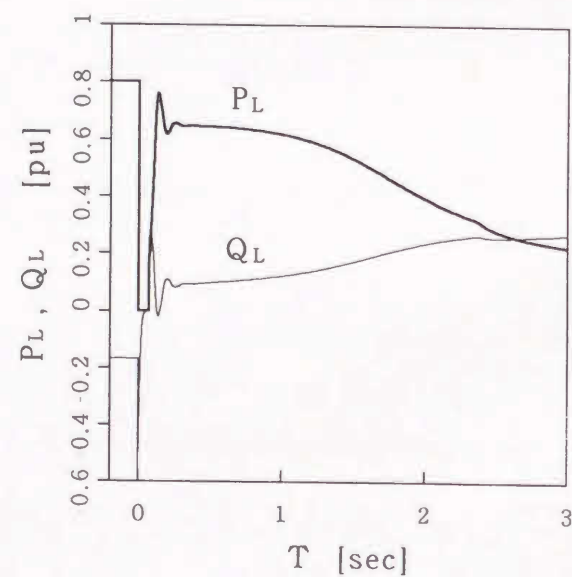
付図4-3

SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果1

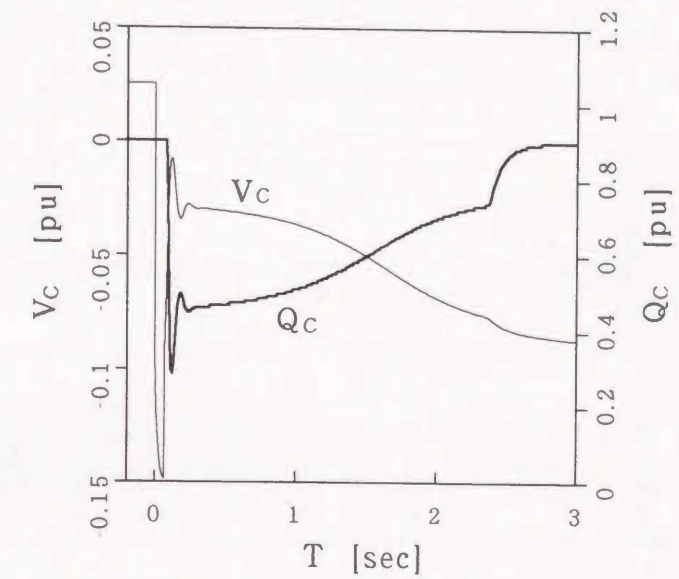
条件：負荷  $P_L=0.80$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu]，SC容量  $Y_{co}=0.30$  [pu]  
SVC容量=0.14 [pu]



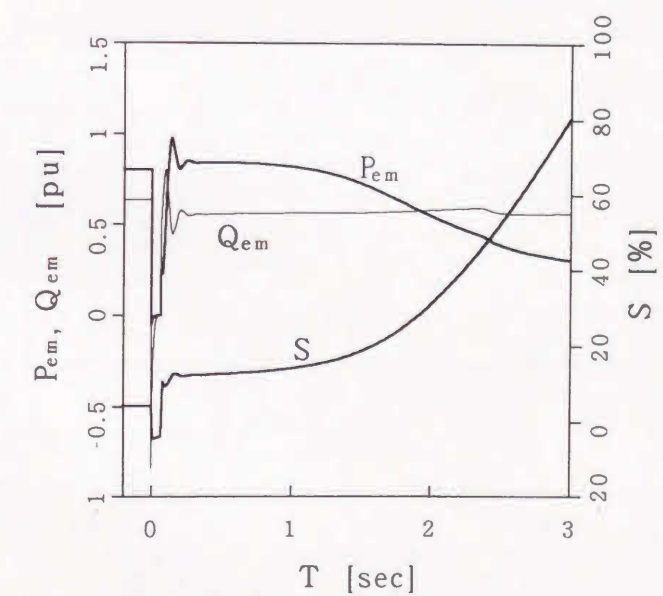
(a) 電源発電機電圧  $V_S$ ，受電端電圧  $V_R$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ ，負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)



(c) SVC無効電力  $Q_C$ ，端子電圧  $V_C$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ ，無効電力  $Q_{em}$ ，すべり  $S$

付図4-3 SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果1

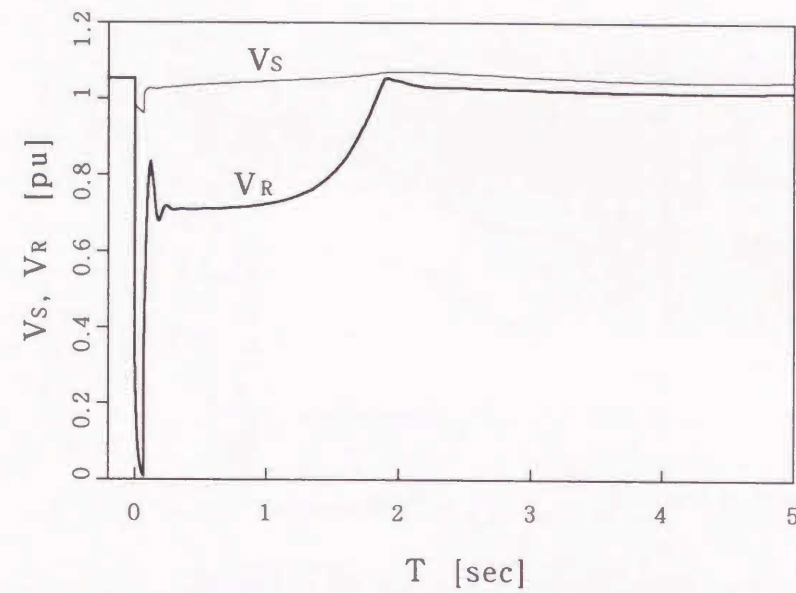


付図4-4

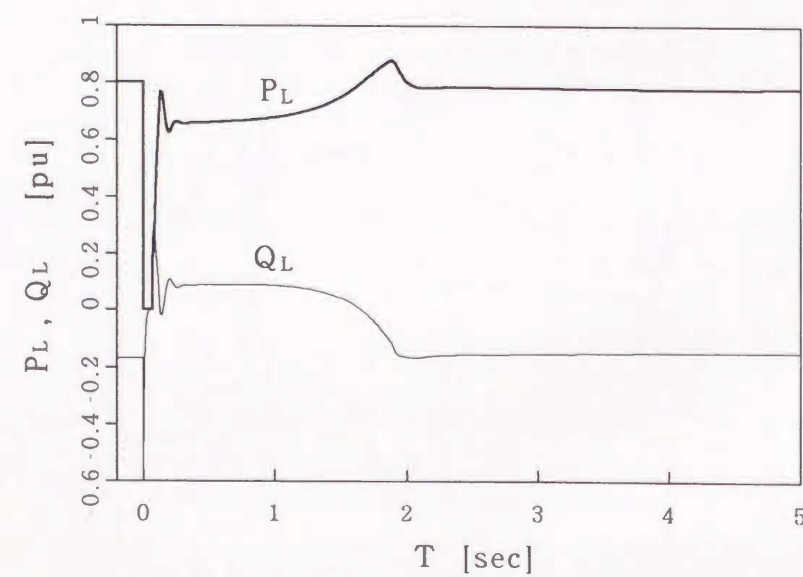
SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果2

条件：負荷  $P_L=0.80$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu]，SC容量  $Y_{co}=0.30$  [pu]

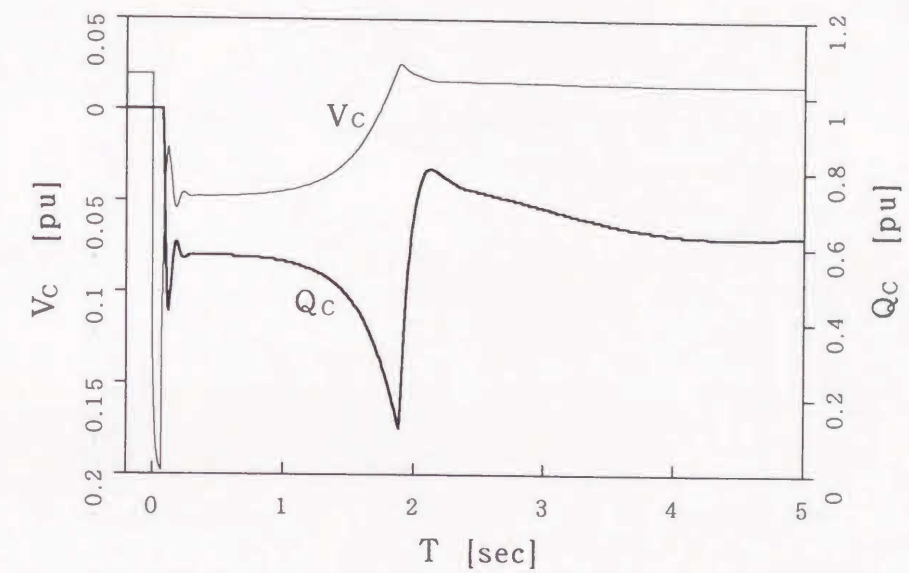
SVC容量=0.15 [pu]



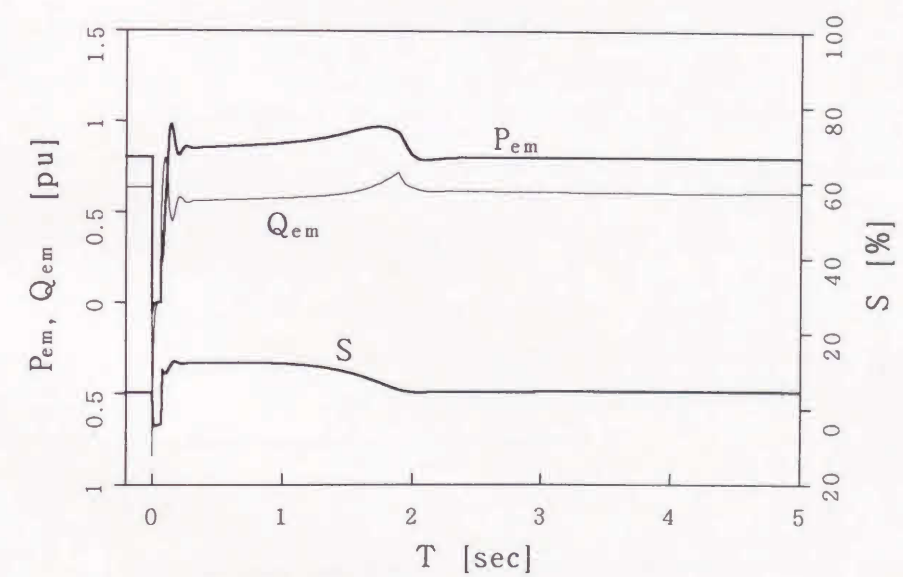
(a) 電源発電機電圧  $V_S$ ，受電端電圧  $V_R$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ ，負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)



(c) SVC無効電力  $Q_C$ ，端子電圧  $V_C$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ ，無効電力  $Q_{em}$ ，すべり  $S$

付図4-4 SVCによる電圧安定化のシミュレーション結果2

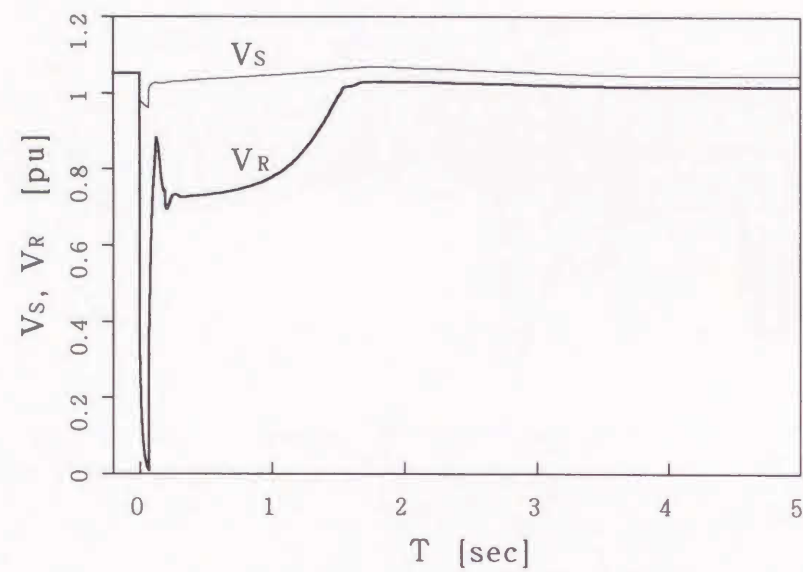


付図4-5

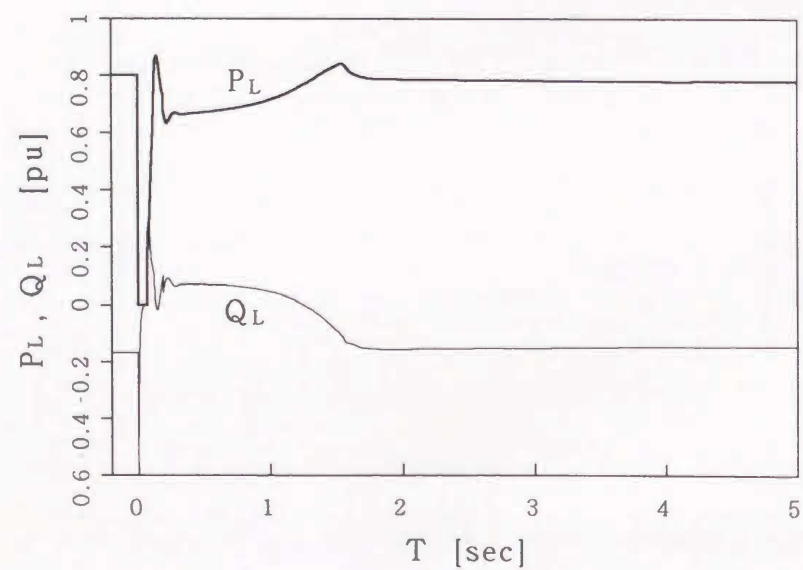
ATSCによる電圧安定化のシミュレーション結果

条件：負荷  $P_L=0.80$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu]，SC容量  $Y_{c0}=0.30$  [pu]

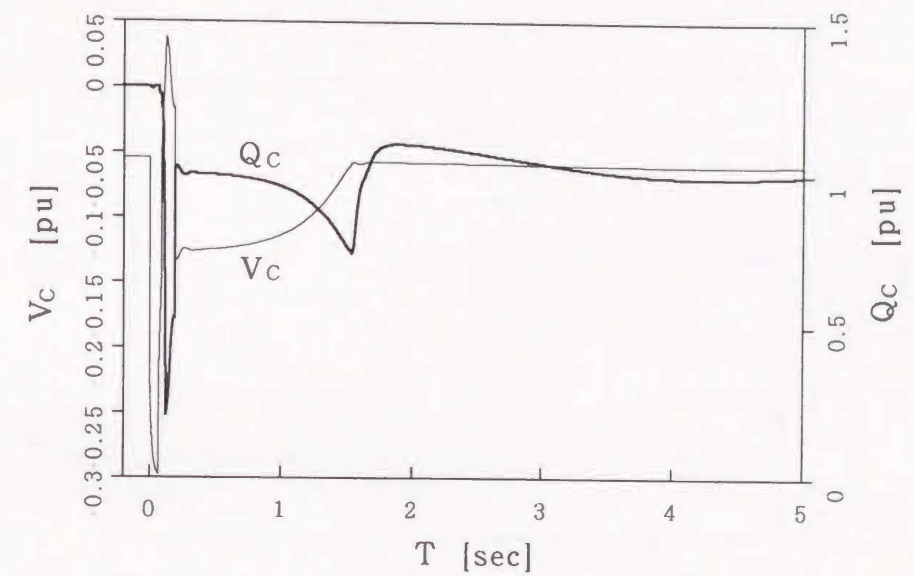
ATSC容量=0.11 [pu]



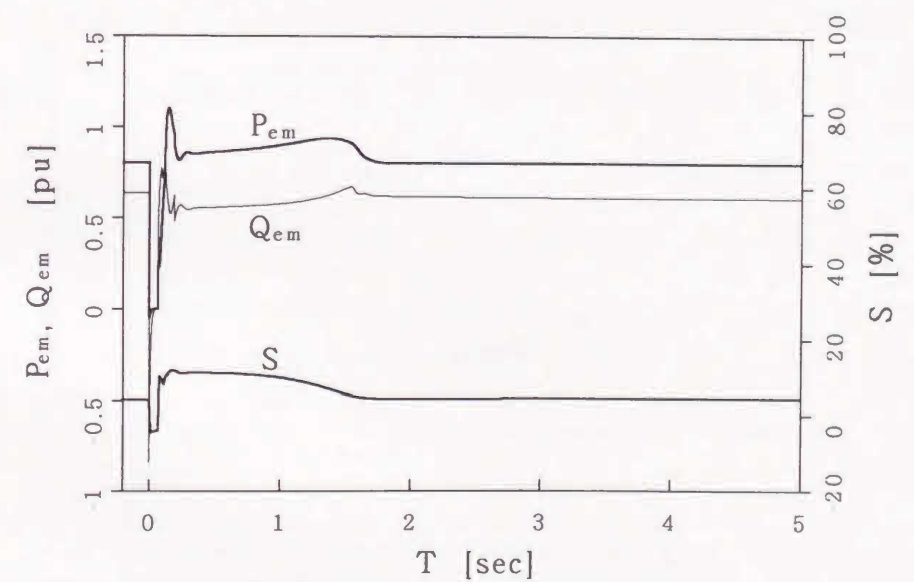
(a) 電源発電機電圧  $V_S$ ，受電端電圧  $V_R$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ ，負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{c0}$ 分を含む)



(c) ATSC無効電力  $Q_C$ ，端子電圧  $V_C$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ ，無効電力  $Q_{em}$ ，すべり  $S$

付図4-5 ATSCによる電圧安定化のシミュレーション結果

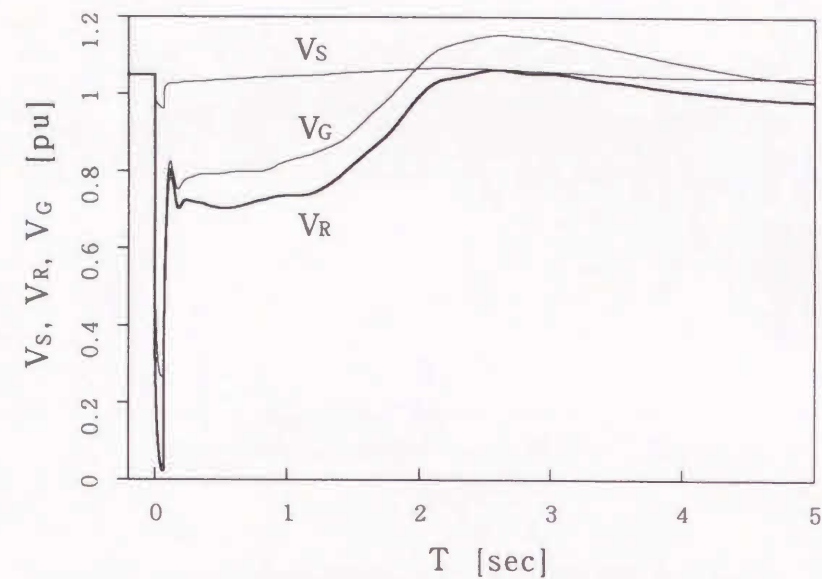


付図4-6

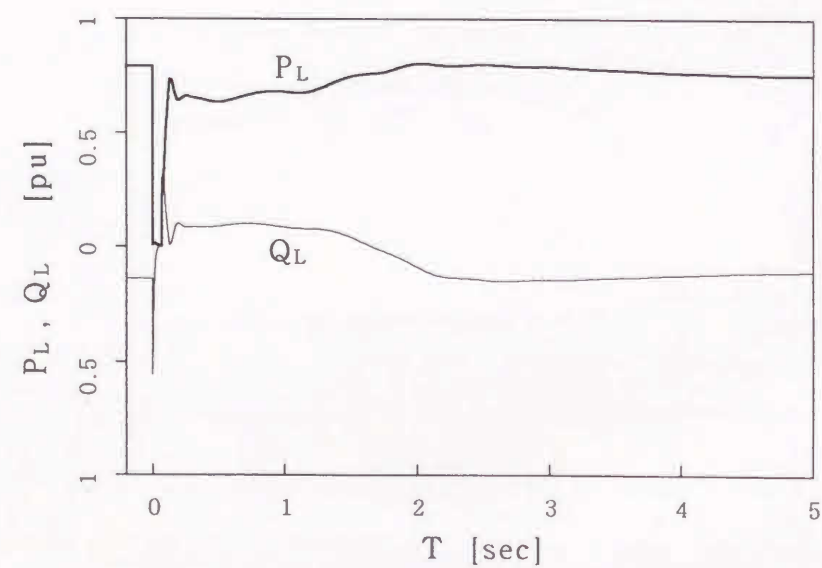
発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果 1

条件：負荷  $P_L=0.79$  [pu] , 受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu] , SC容量  $Y_{C0}=0.28$  [pu]

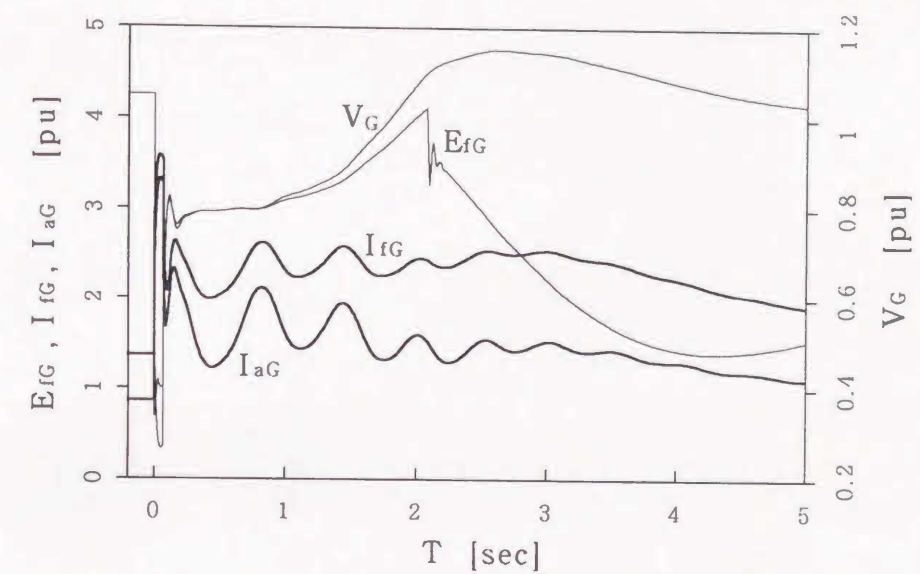
発電機容量=0.05 [pu]



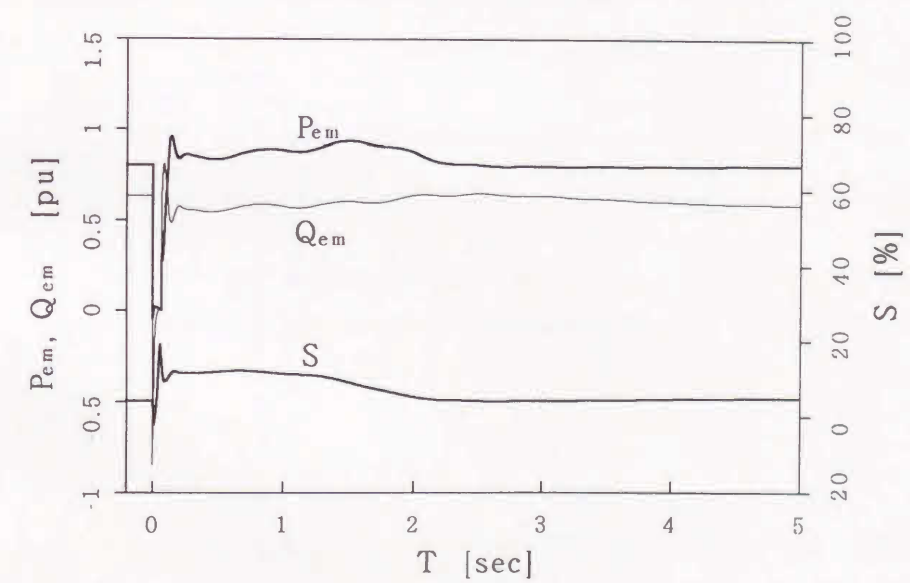
(a) 電源発電機電圧  $V_S$  , 受電端電圧  $V_R$  , 発電機電圧  $V_G$



(b) 負荷有効電力  $P_L$  , 負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{C0}$ 分を含む)

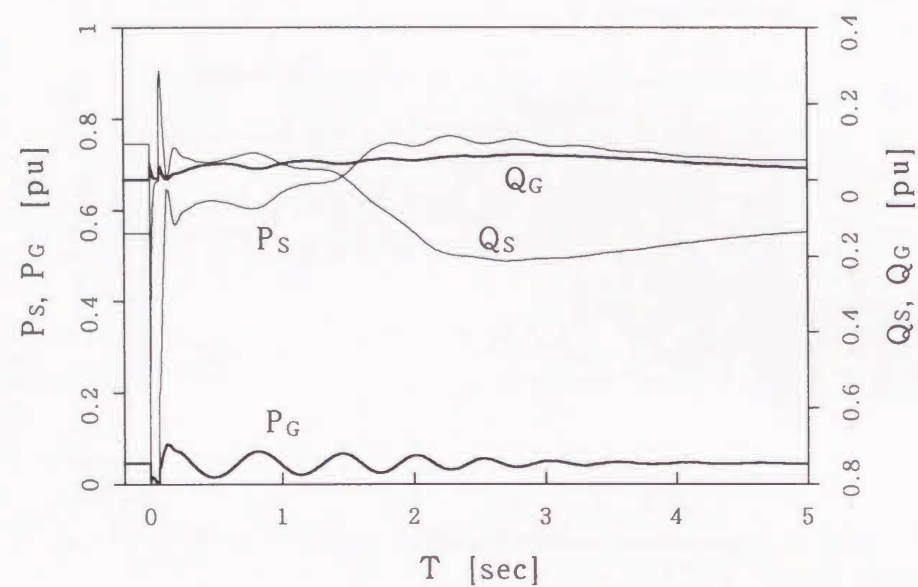


(c) 界磁電圧  $E_{fG}$  , 界磁電流  $I_{fG}$  , 発電機電流  $I_{aG}$



(d) IM有効電力  $P_{em}$  , 無効電力  $Q_{em}$  , すべり  $S$





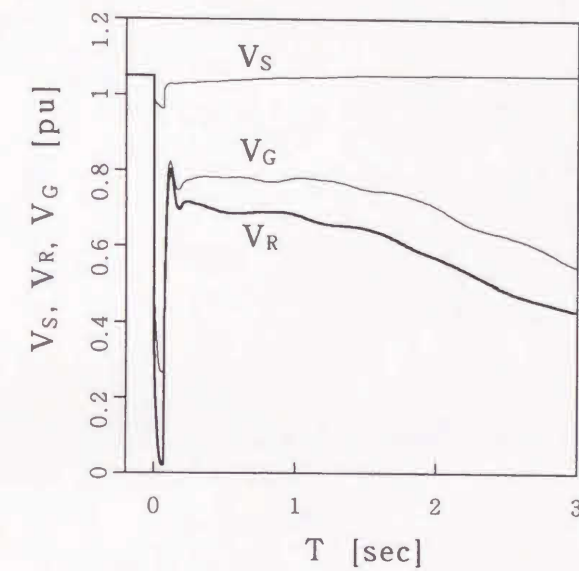
(e) 受電端の有効潮流P, 無効潮流Q

付図4-6 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果1

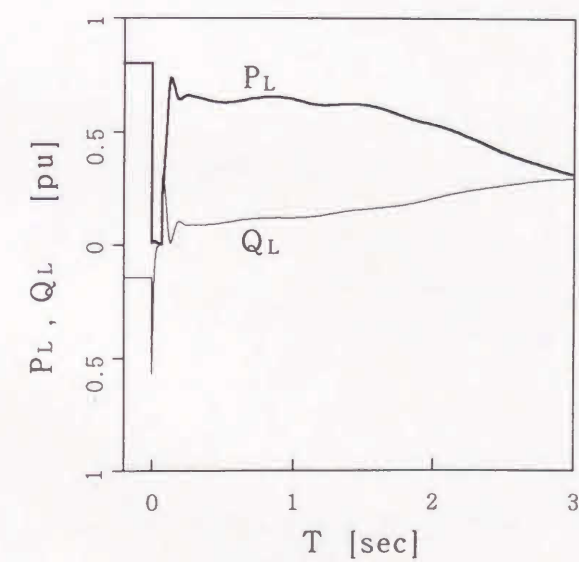
付図4-7

発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果2

条件: 負荷  $P_L=0.80$  [pu], 受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu], SC容量  $Y_{co}=0.28$  [pu]  
 発電機容量=0.05 [pu]

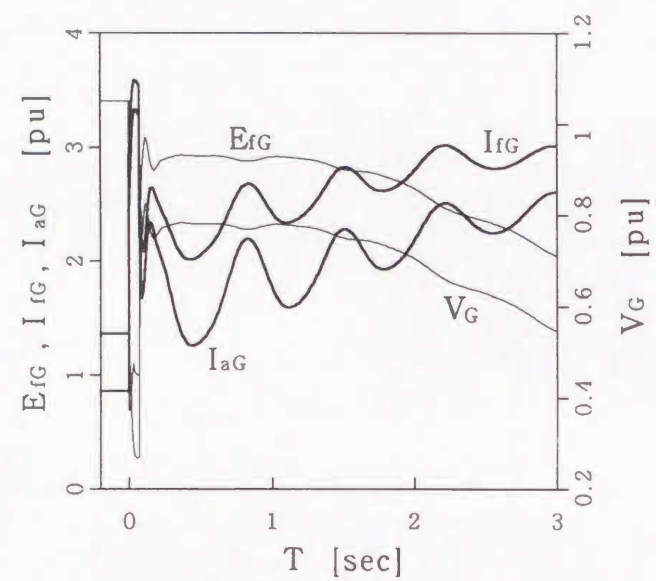


(a) 電源発電機電圧  $V_s$ , 受電端電圧  $V_R$ , 発電機電圧  $V_G$

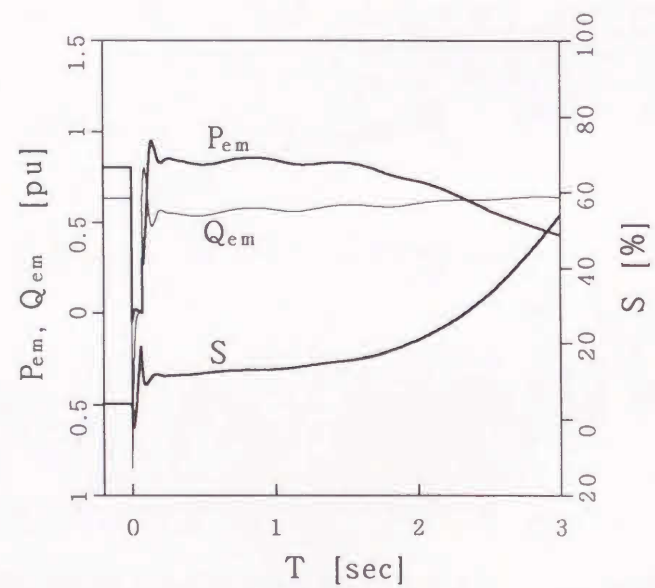


(b) 負荷有効電力  $P_L$ , 負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)

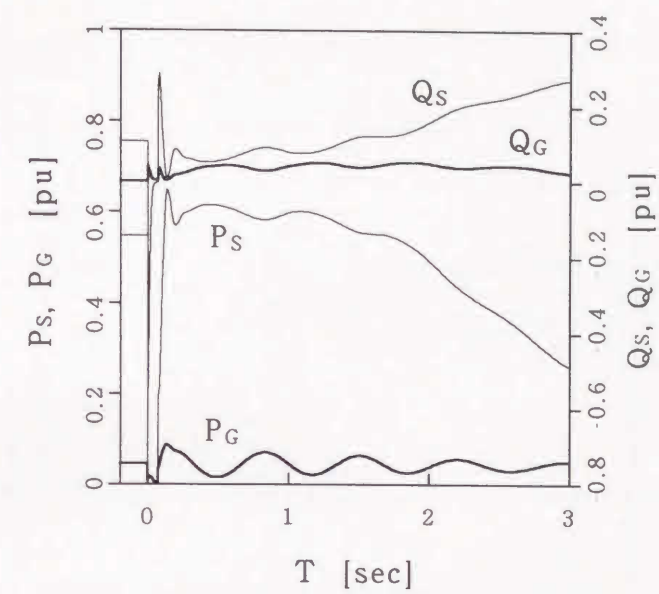




(c) 界磁電圧  $E_{fG}$ , 界磁電流  $I_{fG}$ , 発電機電流  $I_{aG}$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ , 無効電力  $Q_{em}$ , すべり  $S$



(e) 受電端の有効潮流  $P$ , 無効潮流  $Q$

付図4-7 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果2

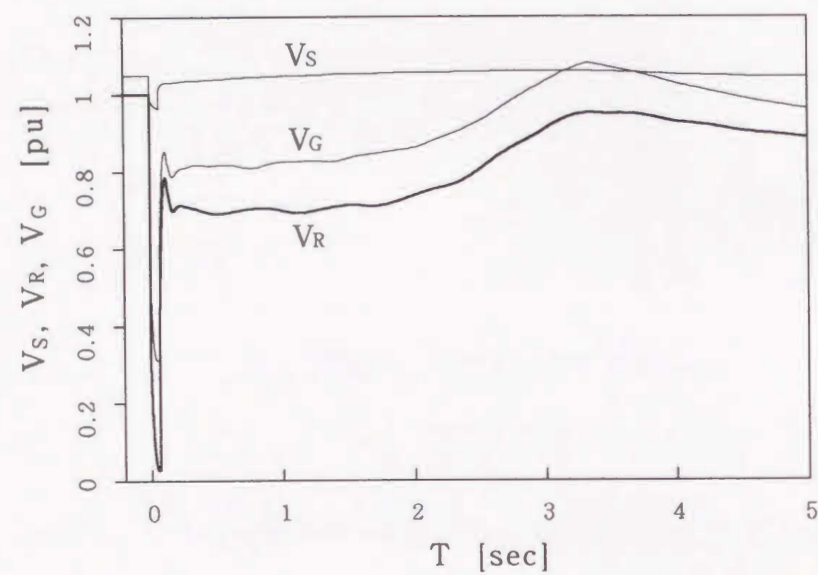


付図4-8

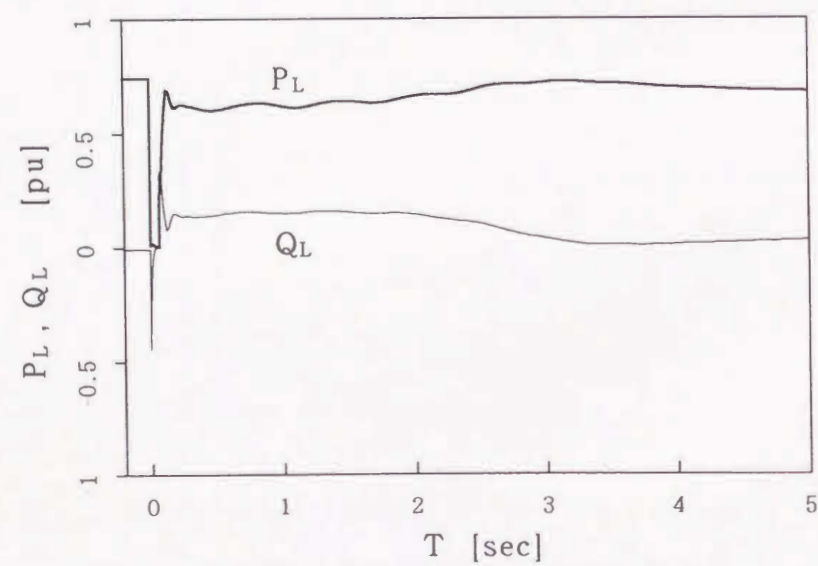
発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果3

条件：負荷  $P_L=0.74$  [pu]，受電端目標電圧  $V_{ref}=1.0$  [pu]，SC容量  $Y_{co}=0.16$  [pu]

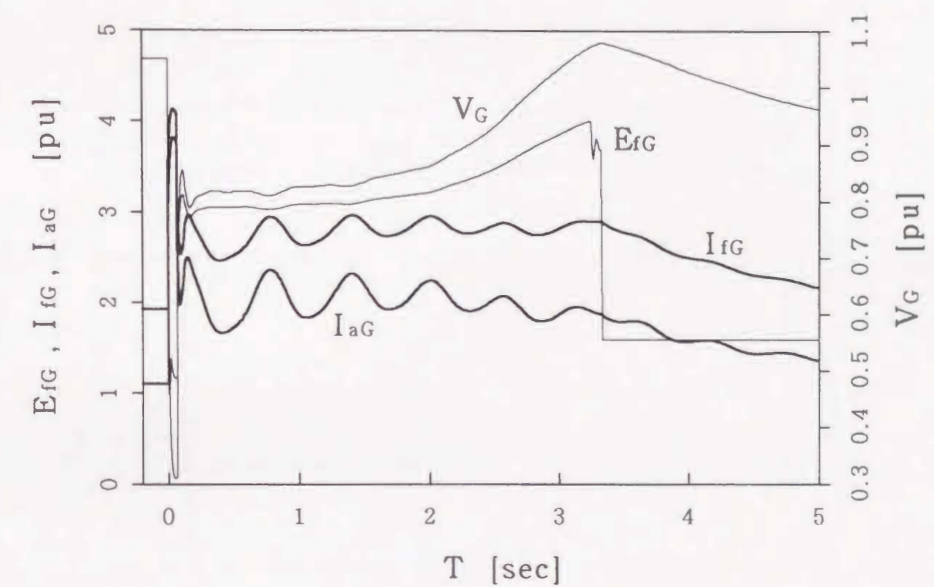
発電機容量  $=0.05$  [pu]



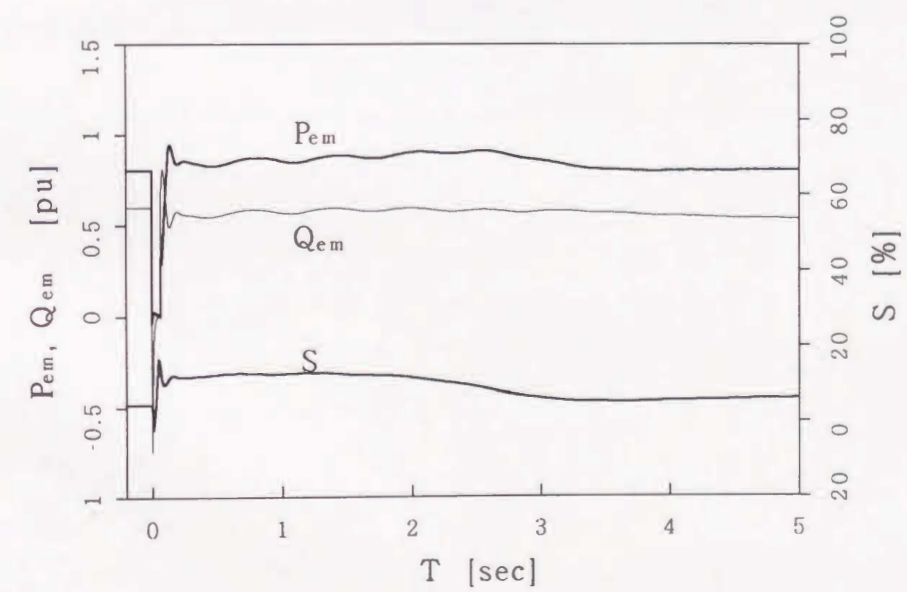
(a) 電源電圧  $V_S$ ，受電端電圧  $V_R$ ，発電機電圧  $V_G$



(b) 負荷有効電力  $P_L$ ，負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)

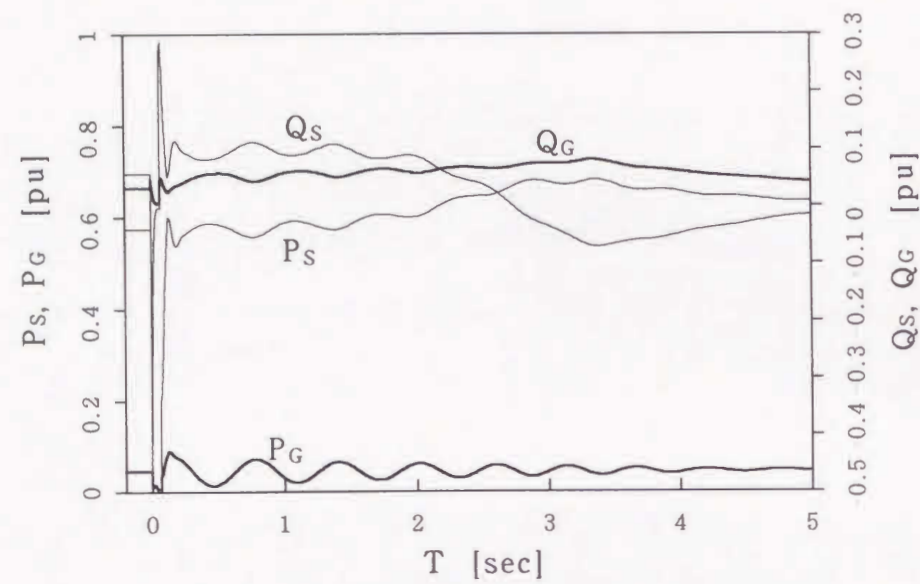


(c) 界磁電圧  $E_{fG}$ ，界磁電流  $I_{fG}$ ，発電機電流  $I_{aG}$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ ，無効電力  $Q_{em}$ ，すべり  $S$





(e) 受電端の有効潮流P, 無効潮流Q

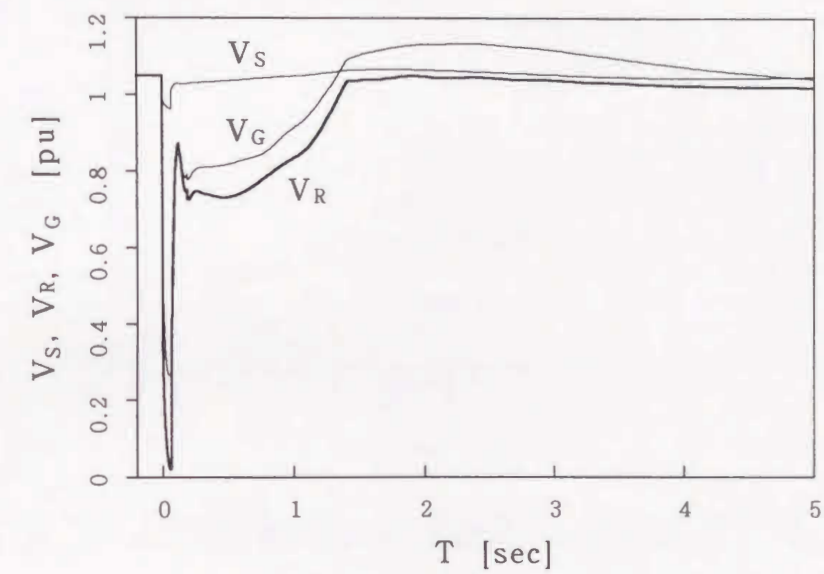
付図4-8 発電機の電圧安定化効果のシミュレーション結果3

付図4-9

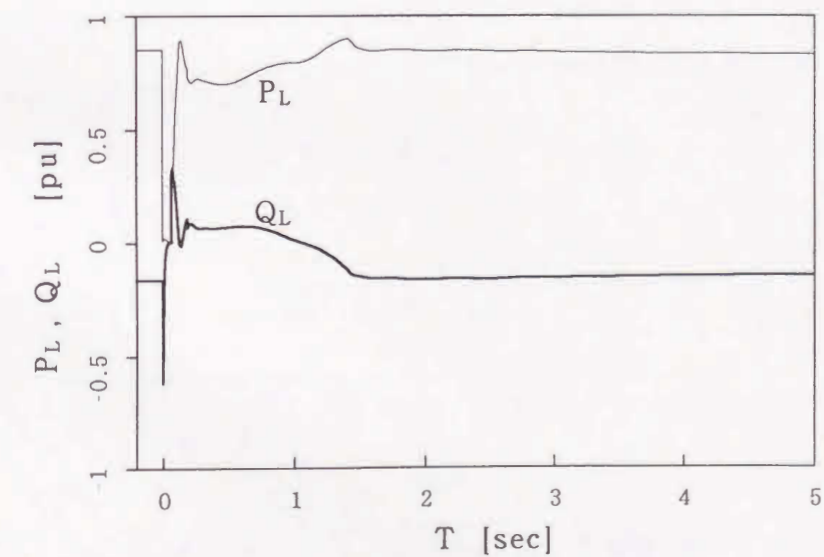
発電機とA T S Cの電圧安定化効果のシミュレーション結果

条件: 負荷  $P_L=0.85$  [pu], 受電端目標電圧  $V_{ref}=1.05$  [pu], S C容量  $Y_{co}=0.31$  [pu]

発電機容量=0.05 [pu], A T S C容量=0.08 [pu]

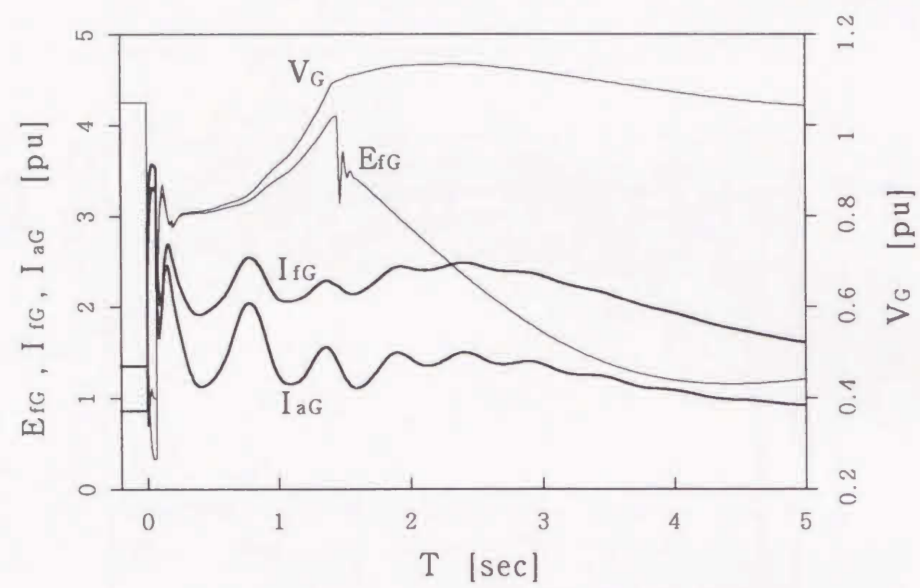


(a) 電源電圧  $V_S$ , 受電端電圧  $V_R$ , 発電機電圧  $V_G$

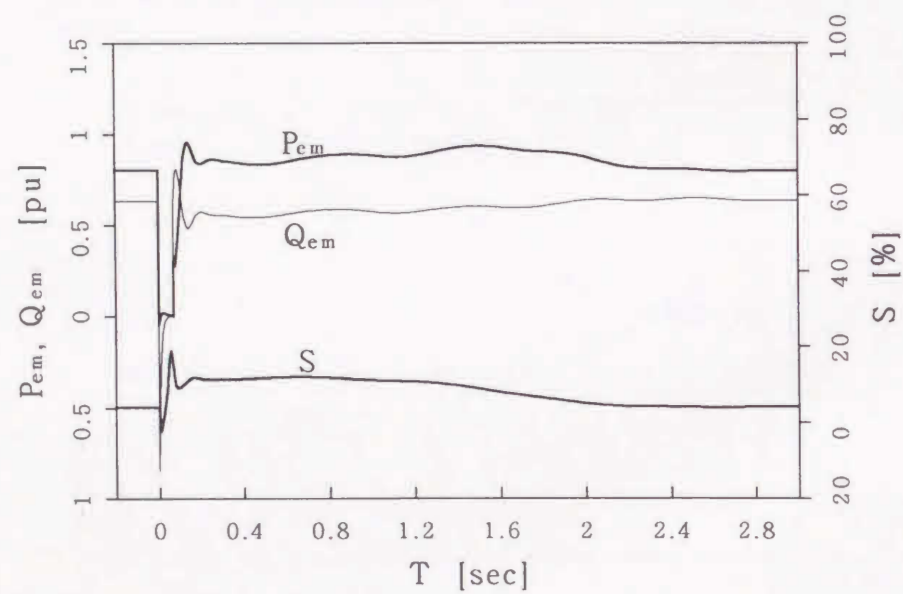


(b) 負荷有効電力  $P_L$ , 負荷無効電力  $Q_L$  ( $Y_{co}$ 分を含む)

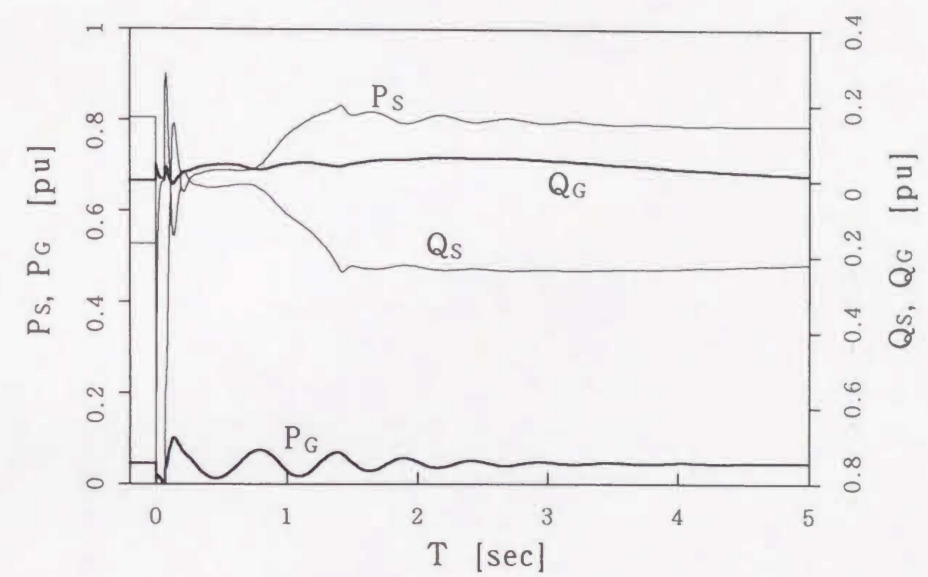




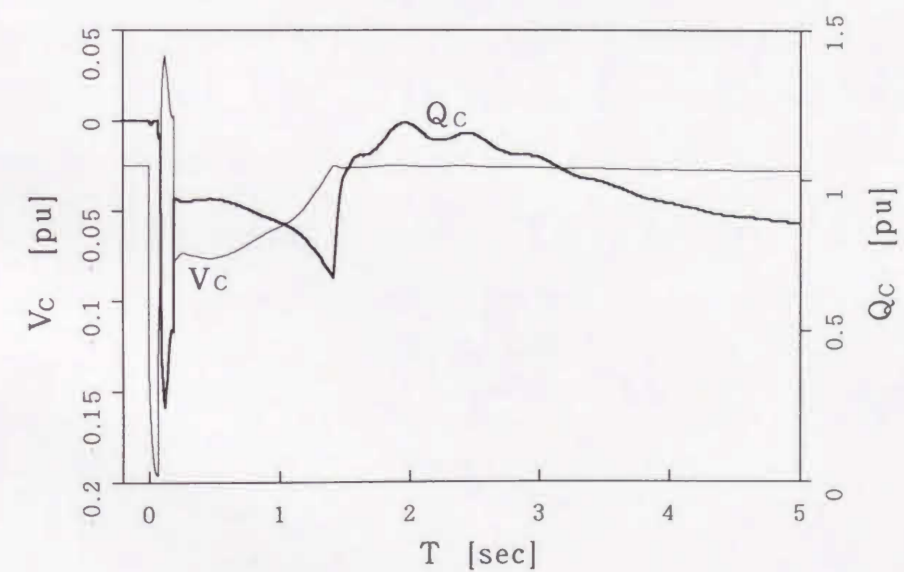
(c) 界磁電圧  $E_{fG}$ , 界磁電流  $I_{fG}$ , 発電機電流  $I_{aG}$



(d) IM有効電力  $P_{em}$ , 無効電力  $Q_{em}$ , すべり  $S$



(e) 受電端の有効潮流  $P$ , 無効潮流  $Q$



(f) ATSC無効電力  $Q_c$ , 端子電圧  $V_c$

付図4-9 発電機とATSCの電圧安定化効果のシミュレーション結果



参 考 文 献



文 献 名	著者名	学会名	年月日
(1) 電力系統の安定化技術	電気学会	電気学会技術報告Ⅱ部 No238	昭和61年
(2) 適応形発電機安定化制御	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 下村 勝	電気学会全国大会	昭和59年3月
(3) 適応形発電機安定化装置の試作と試験	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 下村 勝 田中誠一	電気学会全国大会	昭和60年3月
(4) 適応形発電機安定化装置のフィールド 試験	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 下村 勝 田中誠一	電気学会全国大会	昭和61年3月
(5) タービン高速バルブ制御装置	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 下村 勝 佐々木俊之 伊豫徳保	電気学会全国大会	昭和61年3月
(6) Coordinated Stabilizing Control of Exciter, Turbine and Breaking Resister	石黒富士男 下村 勝 田中誠一 前田龍己 松下邦雄 杉本 宏	IEEE Trans.Power systems Vol. PWRS 1, No.3 pp.74-80	Aug. 1986
(7) Integrated Control of Generator Stability by Microcomputer	前田龍己 松下邦雄 杉本 宏 石黒富士男 下村 勝 田中誠一	IFAC symposium	Aug. 1986
(8) 励磁系、タービン、制動抵抗器を統合 した適応形制御方式による安定度の向 上	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 田中誠一 下村 勝	電気学会論文誌B106巻 11号 pp.933-940	昭和61年11月



文 献 名	著者名	学会名	年月日
(9) 励磁系、タービン、制動抵抗器を統合した適応形制御方式の試作	杉本 宏 松下邦雄 前田龍己 石黒富士男 下村 勝 田中誠一	電気学会論文誌 B 106 巻 11 号 pp.941-948	昭和61年11月
(10) 電力系統安定運用技術	電気協同 研究会	電気協同研究47巻第1号	平成3年7月
(11) 電圧安定性問題についての最近の動向	田村康男	電気学会論文誌 B 110 巻 11 号 pp.862-869	平成2年11月
(12) 誘導機モデルを用いた電圧崩壊現象の過渡解析の検証と一般系統への拡張	大槻博司 横山明彦 関根泰次	電気学会論文誌 B 112 巻 8 号 pp.677-634	平成4年8月
(13) 電力系統における電圧不安定現象の解析	余利野直人 ほか	電気学会論文誌 B 112 巻 3 号 pp.229-236	平成4年3月
(14) 大規模電力系統の電圧安定性解析と運用指標	田中和幸 竹中 清 長尾侍士	電気学会論文誌 B 110 巻 11 号 pp.920-928	平成2年11月
(15) 負荷の動特性が電圧の安定性に及ぼす影響について	田山幸彦 ほか	電気学会技術研究会資料 PE-89-11	平成元年
(16) 電圧の部分崩壊とその波及	大槻博司 ほか	電気学会電力技術研資 PE-89-14	平成元年
(17) 過渡電圧崩壊過程における電力用コンデンサ投入による逆動作現象について	多田泰之 ほか	電気学会電力技術研資 PE-89-30	平成元年
(18) 無効電力補償装置による長距離送電系統の電圧安定特性向上効果	長谷川泰三 ほか	電気学会電力技術研資 PE-90-23	平成2年11月
(19) 潮流多根解を利用した静的電圧安定度指標	横山明彦 熊野照久 関根泰次	電気学会論文誌 B 110 巻 11 号 pp.870-879	平成2年11月
(20) 電力系統の電圧安定限界の直接解法	鈴木 守 柵木 堅	電気学会論文誌 B 110 巻 11 号 pp.895-902	平成2年11月
(21) 系統不平衡故障時を含む動的電圧安定性に関する基礎的検討	前田龍己 森田倫弘 松下邦雄	電気関係学会四国支部連 合大会3-4 pp.101-102	平成3年11月
(22) 負荷動特性と動的電圧安定性に関する基礎実験と考察	前田龍己 森田倫弘 松下邦雄 大西徳生 鈴木茂行	電気学会全国大会	平成4年3月

文 献 名	著者名	学会名	年月日
(23) 電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察	前田龍己 大西徳生 鈴木茂行	電気学会論文誌 B 114 巻 2 号 pp.145-151	平成6年2月
(24) インバータエアコンの負荷特性に関する調査研究	前田龍己 森田倫弘 松下邦雄 大西徳生 鈴木茂行	電気関係学会四国支部連 合大会	平成4年11月
(25) 安定度解析のための誘導電動機負荷の表現法	谷口経雄 ほか	電気学会論文誌 B 92 巻 5 号 pp.323-332	昭和47年5月
(26) 電力系統過渡解析論	関根泰次	オーム社	昭和59年
(27) パワーエレクトロニクス技術応用機器による電圧安定性の向上に関する基礎検討	前田龍己 森田倫弘 松下邦雄 大西徳生 鈴木茂行 渡辺 優	電気関係学会四国支部連 合大会3-5 pp.97-98	平成4年10月
(28) サイリスタ・タップ制御付 SVC による過渡電圧安定化制御方式	前田龍己 大西徳生 鈴木茂行	電気関係学会四国支部連 合大会3-5 pp.65	平成6年10月
(29) 大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発	電中研報告	No.T89071	平成2年
(30) ニューラルネットワーク理論とその電力・エネルギー分野への応用	岩本伸一	電気学会論文誌 B 111 巻 7 号 pp.698-705	平成3年7月
(31) On the Design of a Practical Network for On-line Prediction of V Drops and Line Flpws	H.H.Yan, et al.	Proc.of ESAP '93, pp.703-708	1993年
(32) Visualization of Spatially Differential Security Margins	F.L Alvarado, et al.	Proc.of 11th PSCC, pp.519-525	1993年
(33) ニューラルネットワークによる過渡電圧安定性評価手法に関する基礎的検討	前田龍己 瀧川喜義 寒川文雄 樫葉次郎 横山明彦	電気学会全国大会	平成6年3月
(34) Assessment of Transient Voltage Stability Based on Critical Operating Time of Emergency Control Using Neural Networks	T. Maeda K. Takigawa Y. Minato A.Yokoyama	International Seminar on Bulk Power System Voltage Phenomena III Davos, Switzerland	22-26 Aug. 1994



文 献 名	著者名	学会名	年月日
(35)ニューラルネットによる緊急制御の臨界余裕時間を指標とした過渡電圧安定性の評価	前田龍己 瀧川喜義 湊 嘉徳 横山明彦	電気学会論文誌B 115巻 3号	平成7年3月
(36)系統構成変更制御による過渡電圧安定性の向上に関する基礎的検討	前田龍己 大西徳生 鈴木茂行	電気学会全国大会	平成6年3月
(37)送電線の緊急切換え制御に選る電力系の安定化に関する基礎的考察	岡本 浩 横山明彦 関根泰次	電気学会論文誌B 112巻 11号 pp.997-1006	平成4年11月
(38)Parallel Distributed Processing	D.E Rumelhart, et al.	Vols. 1, 2, MIT Press	1986年

## 謝 辞

本研究の実施とまとめにあたり、懇篤な御教示や御示唆のほかさまざまな御高配を賜った徳島大学工学部鈴木茂行教授、大西徳生助教授に衷心より感謝の意を表します。

本研究の遂行において、貴重な御教示や御高配を賜った東京大学工学部横山明彦助教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究を進める上で、並々ならぬ激励と御厚情を賜った信州大学工学部山田一教授に深く感謝致します。

本研究の機会とあたたかい励ましや御高配をいただいた(株)四国総合研究所三木昭二社長、井上博文所長、湊嘉徳部長ならびに松下邦雄主席研究員、川崎憲介主席研究員はじめ、電力技術部の方々、社内外関係各位に心より御礼申し上げます。



